

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA MECHANICKÉ TECHNOLOGIE

**Snížení nákladů na výrobu nožových držáků
s využitím monolitních fréz**

**Decrease of costs for production tool holders with
usage sole milling cutters**

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Novák Josef, CSc.

Bakalář: Neklapil Ondřej

Datum odevzdání: 22. 5. 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem mojí bakalářské je porovnání nástrojů pro výrobu soustružnických VBD nožových držáků firmou Pramet Tools s.r.o. v Šumperku. Pro výrobu soustružnických nožových držáků jsou v současné době používány monolitní frézy a jsou vyráběny na 5-ti osém obráběcím CNC centru MERMLE C30-U. Současně používané nástroje jsem porovnával s nástroji nové generace. Porovnávala se velikost sortimentu, trvanlivost nástrojů (z hlediska výdrže nástroje, počtu vyrobených kusů, oštípání hran nástroje), cena nástrojů, zkrácení výrobních časů (možnost zvýšení řezných podmínek). Z výsledků zkoušek vyplývá, že nová generace nástrojů vydrží mnohem více a mají vyšší produktivitu práce.

ANNOTATION OF THESIS

The aim of my diploma work was to compare machines for the production of turned VBD cutter holders from the company Pramet Tools s.r.o. Šumperk. At the present time these cutters are turned on solid carbide lathes and are produced on a 5-axis CNC milling centre MERMLE C30-U. I compared this to another generation of tools. I compared the extent of their product range, working life of the tool (with regard to tool durability, number of pieces produced, edge splitting), price of the tool and reduction in production time (potential for increasing cutting rate). From the results of test follow on that the new generation of tools holds much more and they have higher productivity of labour.

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Josefu Novákovi, CSc. za umožnění vypracování bakalářské práce pod jeho vedením. Dále děkuji firmě Pramet Tools s.r.o. sídlem Uničovská 2 Šumperk za poskytnutí všech podkladů pro vypracování bakalářské práce. Dále panu Petru Kobylkovi za přínosnou pomoc při vytváření bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	6
1. Analýza současného stavu	8
1.1 Popis řešeného problému	8
2. Monolitní frézy	9
2.1 Monolitní frézy.....	9
2.2 Materiály pro výrobu nástrojů	10
2.3 Slinuté karbidy	13
2.3.1 Historický vývoj	13
2.3.2 Nepovlakované slinuté karbidy	19
2.3.2.1 Rozdělení a značení	19
2.3.2.2 Výroba SK	20
2.3.2.3 Příprava směsi karbidů a pojiva.....	22
2.3.2.4 Formování směsi.....	23
2.3.2.5 Slinování	25
2.3.2.6 Technologie slinování.....	25
2.3.2.7 Struktura a vlastnosti	26
2.4 Povlakované slinuté karbidy	30
3. Posouzení současného stavu při výrobě nožových držáků z hlediska technologie a použitého nářadí.....	31
4. Výsledky zkoušek monolitních fréz	34
4.1 SE30 – geometrie při 180-200 HB	34
4.2 SE45-geometrie při 47 HRC – Stranové frézování	39
4.3 SE45 – geometrie při 47 HRC – Uzavřené drážky	41
5. Návrh řešení a zhodnocení navrženého řešení.....	44
Závěr	45

Snížení nákladů na výrobu monolitními frézami je tématem mé bakalářské práce ve firmě Pramet Tools s.r.o. v Šumperku, která se zabývá výrobou obráběcích nástrojů ze slinutých karbidů. Výroba slinutých karbidů zde vychází z tradice výroby SK v Československu od 30. let 20. století. V roce 1951 byla zahájena v Šumperku výroba součástí ze slinutého karbidu a také zde započala výroba řezných nástrojů osazených slinutým karbidem. Více než 50-ti letá tradice a zkušenosti ve výrobě slinutého karbidu, stejně jako reprodukovatelná kvalita materiálů a kontinuální výzkum i vývoj umožnily firmě Pramet udržet si vedoucí pozici v daném sortimentu na tuzemském teritoriu a také získávat stále vyšší uplatnění na náročných exportních trzích.

Od roku 1999 započala nová etapa společnosti Pramet Tools. Došlo k propojení s finančně silným partnerem, který zaujímá přední světovou pozici mezi výrobci obráběcích nástrojů osazených slinutým karbidem. Společnost navýšila své základní jmění na 250 mil. Kč a získané prostředky byly použity na nákup aktiv. Následně v dalším období proběhly investice již z vlastních zdrojů. Byly pořízeny nové technologie pro moderní výrobu vyměnitelných břitových destiček, došlo k přestěhování obchodního oddělení a části výroby do obnovených prostor, rozšířily se výzkumné a vývojové aktivity, proběhly optimalizace informačních systémů a reorganizační změny, vzniklo nové oddělení logistiky a také došlo k posílení technického servisu a poradenství zákazníkům. V neposlední řadě byla rozšířena síť poboček – byly založeny pobočky v Polsku a Itálii.

Od roku 2000 společnost Pramet Tools díky vlastnímu vývoji a výzkumu prakticky kompletně inovovala výrobní sortiment nástrojů pro třískové obrábění, a to jak po stránce materiálové, tak po stránce nových tvarů a geometrií nástrojů, stejnou inovací prošly i materiály pro tvářecí a lisovací nářadí ze slinutých karbidů. Nový sortiment tak dnes plně odpovídá požadavkům moderních technologických postupů obrábění a ve srovnání s původním sortimentem je zde nárůst výkonnosti o mnoho desítek procent.

Zavádění logistických systémů, komplexní reorganizace dopravy a řízení skladů umožnilo plnit požadavky zákazníků na dodávky zboží v nejkratší možné době. Firma je schopna dodat skladový sortiment do 24 hodin v tuzemsku, respektive do 48 hodin v zahraničí, kde má své pobočky.

Společnost Pramet Tools prodává v tuzemsku své výrobky prostřednictvím vlastních regionálních prodejců, kteří poskytují současně technický servis, a administrativního oddělení prodeje. Dále prodává své výrobky v ČR prostřednictvím smluvních distributorů.

Zahraničním zákazníkům na Slovensku, do Polska, Německa a Itálie dodává společnost Pramet Tools své výrobky prostřednictvím poboček, do dalších zemí dodává své výrobky exportním oddělením prodeje nebo prostřednictvím smluvních prodejců.

1. Analýza současného stavu

1.1 Popis řešeného problému

Cílem této bakalářské práce je porovnat obráběcí nástroje, konkrétně monolitní frézy, které jsou používány firmou Pramet Tools s.r.o. při obrábění nožových VBD držáků s označením A32S-PTFNR 16 G1 /8 pro řezné destičky ze SK, které se obrábí na jedno upnutí polotovaru na 5-ti osém CNC obráběcím centru HERMLE C30-U. V současné době je zkoušena nová generace monolitních fréz. Podle předběžných testů monolitních fréz nové generace vyplynulo, že by tyto nástroje mohly být na lepší úrovni než nástroje současné generace, proto je nutno se zaměřit na srovnání současné a nové generace nástrojů. Nástroje se porovnávaly z hlediska – trvanlivost nástroje (pracovní čas, počet vyrobených kusů, oštípání hran), cena, velikost sortimentu, zkrácení výrobních časů a toto se porovnávalo na frézách shodných průměrů a způsobu provedení.

2. Monolitní frézy

2.1 Monolitní frézy

Jsou to nástroje používané pro obráběcí operace. Jsou vyrobeny z jednoho kusu materiálu, tudíž nemají žádné vyměnitelné nebo spojované části. Monolitní frézy se mohou vyrábět z různých materiálů, ale firma Pramet Tools s.r.o. používá monolitní frézy vyrobené ze slinutých karbidů.



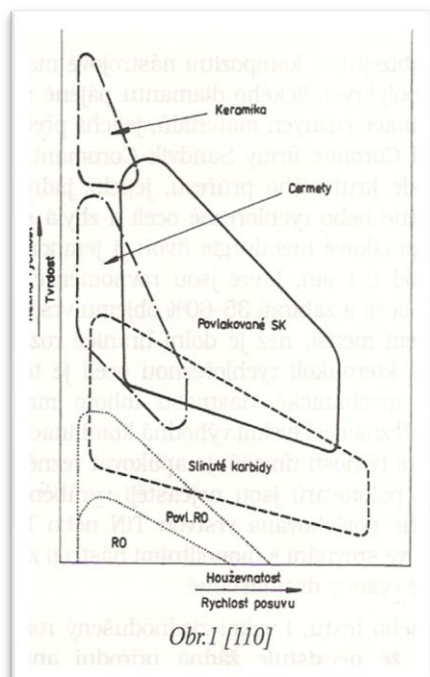
2.2 Materiály pro výrobu nástrojů

[2]

Současný poměrně široký sortiment materiálů pro řezné nástroje, od nástrojových ocelí až po syntetický diamant, je důsledkem celosvětového dlouholetého a intenzivního výzkumu a vývoje v dané oblasti a má úzkou souvislost s rozvojem konstrukčních materiálů určených pro obrábění, i s vývojem nových obráběcích strojů, zejména s číslicovým řízením. Hlavním problémem dnešní doby tedy není hledání

absolutně nových, dosud nepoužívaných řezných materiálů, ale spíše optimální využití již známých materiálů, s velmi přesným vymezením oblastí jejich aplikace.

Na obr. 1 jsou schematicky uvedeny hlavní oblasti aplikace současných nejužívanějších materiálů pro řezné nástroje – bez supertvrdých řezných materiálů, vyjádřené vztah mezi řeznou a posuvovou rychlostí.



Řezná keramika na bázi Al_2O_3 je užívána pro obrábění vysokou řeznou rychlostí a nízkou posuvovou rychlostí, protože má vysokou tvrdost za tepla a vysokou termomechanickou stabilitu, ale nízkou houževnatost. Řezná keramika na bázi Si_3N_4 má vyšší houževnatost a vydrží vyšší posuvovou rychlost než keramika Al_2O_3 , ale její užití je omezeno na obrábění šedé litiny, protože při obrábění ocelí a tvárné litiny vykazuje rychlé opotřebení. Cermety mohou být užity pro vyšší posuvové rychlosti než řezná keramika a pro řezné rychlosti na úrovni povlakovaných slinutých karbidů. Vzhledem k nízké houževnatosti jsou ale jejich aplikace doposud omezeny pouze na lehké a střední řezy (při vyšších posuvech se začíná projevovat jejich nižší tepelná vodivost, dochází k vyšší koncentraci tepla v oblasti špičky a tím o k rychlému plastickému porušení břitu nástroje), dobře se uplatní při obrábění nerezavějících ocelí.

Slinuté karbidy jsou nejpevnějšími materiály mezi tvrdými nástrojovými materiály a mohou být použity pro obrábění vysokými posuvovými rychlostmi a pro

těžké přerušované řezy. Nemohou být ale použity pro vysoké řezné rychlosti, zejména v důsledku své nízké termomechanické stability.

Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termomechanicky stabilního tvrdého povlaku (karbidy, nitridy, oxidy a jejich kombinace). Výsledkem jsou nejlepší materiály pro vysoké řezné i posuvové rychlosti, vysoký úběr materiálu a přerušované řezy.

Diamant a KNB (kubický nitrid boru) mají obzvláště vysokou tvrdost a vynikající odolnost proti opotřebení, ale vzhledem k ceně nástroje, malým možnostem změny jeho tvaru a někdy i ochotné reakci s některými obráběnými materiály jsou jejich současné aplikace omezeny pouze na speciální případy obrábění. Hlavní aplikací diamantu je proto obrábění neželezných slitin, keramiky a nekovových materiálů, zatímco KNB je ideálním nástrojovým materiálem pro obrábění superslitin, kalených ocelí a litin.

Dobré aplikační možnosti nabízejí tzv. kompozitní nástrojové materiály (vyztužené keramiky, silné vrstvy polykrystalického diamantu pájené na podklad SK, atd.), nebo speciální kombinace různých materiálů. Vyrábí se v tyčových polotovarech, obvykle kruhového průřezu, jejichž jádro (asi 50% plochy průřezu) je ze zušlechtné nebo rychlořezné oceli a zbylá silná vnější vrstva je vyrobena metodami práškové metalurgie (tvoří ji jemnozrnné tvrdé částice TiN s velikostí zrna pod $0,1\mu\text{m}$, které jsou rovnoměrně rozptýleny v matrici tepelně zpracovatelné oceli a zabírají 35-60% objemu vrstvy). Protože je objem tvrdých částic mnohem menší, než je dolní hranice rozmezí u slinutých karbidů (ve srovnání s kteroukoli rychlořeznou ocelí je tento objem naopak mnohem větší), jsou mechanické vlastnosti tohoto materiálu na rozhraní slinutý karbid – rychlořezná ocel (velmi výhodná kombinace vynikající houževnatosti a poměrně vysoké tvrdosti umožňuje aplikovat řezné podmínky běžné pro povlakované slinuté karbidy). Z polotovarů jsou nejčastěji vyráběny stopkové frézy, jejichž řezná část je navíc povlakována vrstvou TiN nebo TiCN. Ceny takto vyrobených nástrojů jsou ve srovnání s monolitními nástroji ze slinutých karbidů zhruba poloviční, řezné výkony dvojnásobné.

Jak je zřejmé z výše uvedeného textu, i velmi zjednodušený rozbor jednoznačně potvrzuje skutečnost, že neexistuje žádná přírodní ani člověkem vyrobená látka, která by mohla být použita jako univerzální materiál pro řezné nástroje a to s ohledem na metodu obrábění, obráběný materiál a zejména na pracovní podmínky. Je proto velmi důležité podrobně znát fyzikální a mechanické vlastnosti každého konkrétního nástrojového materiálu a v souladu s nimi stanovit oblasti jeho užití tak, aby výsledný efekt byl optimální jak z hlediska časových nároků a produktivity, tak z hlediska minimalizace výrobních nákladů.

2.3 Slinuté karbidy

[2]

2.3.1 Historický vývoj

Již z dřívějších dob jsou známy látky, které mají vyšší tvrdost než kalené nástrojové oceli. Z přírodních materiálů to jsou např. diamant a korund (Al_2O_3), které sice mohly být ve formě volného abraziva (případně jako brousící kotouče) využívány pro broušení kovů již na přelomu století, nebyly ale v důsledku své nízké houževnatosti vhodné pro klasický řezný nástroj pro obrábění kovů. Kvalitativní skok ve vývoji tvrdých materiálů byl zaznamenán až po využití elektrické pece (zkonstruované na konci 18. Století), která umožnila zvýšit pracovní teploty procesu jejich výroby. Mnoho vědců, inženýrů a vynálezců se právě pomocí elektrické pece pokoušelo vyrobit umělý diamant. Vzhledem k tehdejší úrovni znalostí se jim to samozřejmě nepovedlo, získali přitom ale nové karbidy, boridy a silicidy, tj. tvrdé látky s vysokými teplotami tavení. Mezi nimi zejména karbid wolframu vykazoval vysokou tvrdost a přitom měl mnoho charakteristických vlastností, kterými se podobal kovům. V dané době těmto skutečnostem nebyl připisován velký význam, i když bylo provedeno několik neúspěšných pokusů připravit tento materiál ve formě vhodné pro řezný nástroj nebo průvlak.

V podstatě existují dva typy karbidu wolframu a to WC, který se rozkládá při teplotě $2800\text{ }^\circ\text{C}$ a W_2C , s teplotou tavení $2750\text{ }^\circ\text{C}$. Oba karbidy mají vysokou tvrdost a mohou spolu vytvořit eutektickou slitinu s nižší teplotou tavení, $2525\text{ }^\circ\text{C}$. Tuto slitinu lze s jistými obtížemi odlévat a potom brousit do požadovaného tvaru diamantovými kotouči. Odlitky mají hrubozrnnou strukturu s mnoha defekty, snadno se porušují a nejsou vhodné pro řezné ani lisovací nástroje.

K počátku tohoto století se váže zjištění, že výborné řezné vlastnosti rychlořezných ocelí jsou dány přítomností velmi tvrdých karbidických částic (z nichž největší význam mají zejména částice WC) v kovové matici. Logickým vývojovým krokem se proto jevila možnost zvládnutí výroby řezných nástrojů z čistého karbidu wolframu. Se značnými potížemi (za teplot přesahujících $2000\text{ }^\circ\text{C}$) byl takový materiál připraven, ale pro užití v průmyslové praxi se ukázal příliš křehkým.

Počátkem roku 1900 se podařilo vyrobit žhavící vlákno z wolframového prášku s velikostí zrn řádově několik μm . Tím začal rozvoj práškové metalurgie, vědního a zpracovatelského oboru, který s definitivní platností vyřešil problém výroby nových řezných materiálů na bázi WC, které se vyznačovali do té doby nevídanou tvrdostí a odolností proti opotřebení. K průkopníkům daného oboru patří zejména Karl Schröter, který od roku 1914 pracoval pro firmu Osram v Německu. Na začátku dvacátých let (1923) ohřál práškový wolfram smíchaný s uhlíkem a získal tak práškový karbid wolframu mikrometrické zrnitosti. Při vývoji materiálů pro průvhlaky k tažení drátů zjistil, že pokud se takto vyrobený WC důkladně smíchá s malým množstvím kovu z podskupiny železo – kobalt – nikl (obsahem do 10%, rovněž ve formě jemnozrnného prášku) a vylisovaný celek je ohříván na vysokou teplotu (nad $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, ve vodíkové atmosféře), lze získat výrobek s nízkou pórovitostí, velmi vysokou tvrdostí a značnou pevností. Výsledný materiál je pak dokonale vytvrzen a skládá se z velmi rovnoměrně rozptýlených tvrdých zrn WC, spojených do jednoho celku houževnatým kovem (brzy bylo zjištěno, že nejvhodnějším pojícím kovem je kobalt).

I když první výzkumné práce v oblasti vývoje a výroby slinutého karbidu typu WC-Co u firmy Osram (1923-1925, tab. 1) byly zaměřeny zejména na drátové průvhlaky, unikátní soubor vlastností předurčil tento nový materiál zejména pro aplikaci ve formě řezného nástroje (koncem 80. let tohoto století bylo asi 50% celkové produkce slinutých karbidů užíváno ve formě břitových destiček řezných nástrojů). Nově vyvinutý materiál umožnil řádové zvýšení řezných rychlostí (ve srovnání s nástrojovými ocelemi, včetně rychlořezných) a brzy se stal základem další důležité skupiny nástrojových materiálů, skupiny slinutých karbidů, která dnes zaujímá největší objem materiálů pro řezné nástroje (vyjíměčně se pro slinuté karbidy užívá i název „tvrdokovy“, který vznikl doslovným překladem německého výrazu Hartmetalles).

Průmyslovou výrobu slinutého karbidu typu WC-Co (pod názvem WIDIA – Wie DIAmant = jako diamant, který přetrvává dodnes) rozvinula německá firma Krupp v roce 1926. Na lipském veletrhu byl v roce 1927 představen slinutý karbid Widia N (později označen podle německé normy jako G1), který obsahoval 94% WC + 6% Co. V letech 1930-1932 byly vyrobeny slinuté karbidy Widia s obsahem 11% CO (G2) a 15% Co (G3), následoval druh H1 se stejným složením jako G1, ale s jemnějším

zrnem. Řezné nástroje ze slinutých karbidů typu WC-Co, vyrobené na konci 20. let 20. Století, dosahovaly velmi dobrých výsledků při obrábění litin a barevných kovů mnohem vyššími řeznými rychlostmi, než byly dosud používány u nástrojů z rychlořezných ocelí. Nebyly ale vhodné pro obrábění ocelí, protože již při řezných rychlostech mírně nad hranicí pro rychlořezné oceli, docházelo k rychlé tvorbě výmolu na čele (důsledek difúzního mechanismu opotřebení) a výsledná trvanlivost nástroje byla z tohoto důvodu velmi nízká. Proto se pozornost výrobců zaměřila na další karbidy, zejména TiC, TaC a NbC. V roce 1931 se objevil první slinutý karbid na bázi dvou karbidů – Widia X (86,5% WC + 8,5% TiC + 5% Co), v roce 1932 slinuté karbidy Titanit U1 a Titanit U2 (později známe pod označení S1 a S2) se složením 76-77% WC + 16% TiC + 2% Mo₂C + 5-6% Co a 74-76% WC + 14% TiC + 2% Mo₂C + 8-10% Co. V roce 1935 byl vyroben slinutý karbid S3 s obsahem 4-5% TiC. Produkce slinutých karbidů (všech typů) rostla velmi rychle, z jedné tuny za měsíc v roce 1930 na celoněmeckou produkci 40 tun měsíčně v roce 1944 (přitom je třeba vzít v úvahu tehdejší nedostatek wolframu). V dané době to představovalo mnoho set tisíc vyrobených nástrojových břitů.

Výroba slinutých karbidů u dalších firem v Německu, i v jiných zemích, vycházela z německých patentů na karbidy typu WC-Co. V první fázi byly vyráběny karbidy s obsahem 4-13% Co (Carboloy – USA, Vimet – Velká Británie). Právě vzhledem k patentovým právům měl vývoj SK v USA svůj osobitý směr – v roce 1930 byl vyroben materiál na bázi TaC + Ni (87% + 13%) s označením Ramet, který se používal pro výrobu nástrojů pro obrábění oceli, protože měl vyšší odolnost proti opotřebení (zejména z hlediska tvorby výmolu na čele) než slinuté karbidy typu WC-Co. I když se tento SK neuplatnil jako základ pro další novou, samostatnou skupinu nástrojových materiálů, ukázal další směr rozvoje slinutých karbidů, který spočíval v přidávání kubických karbidů TiC, TaC nebo NbC do slinutého karbidu WC-Co (v poměru 1:1 i více). V prvních letech výroby měly tyto nové SK mnohem vyšší pórovitost než SK typu WC-Co, s rozvojem technologie výroby byl ale uvedený nedostatek velmi rychle odstraněn. Ramet byl později nahrazen karbidem na bázi WC a TaC s pojivem Co + Ni. Tento slinutý karbid byl v USA vyráběn a užíván dlouhou dobu místo slinutých karbidů typu WC-TiC-Co, vyráběných a rozšířených v Evropě. Později našly v USA široké uplatnění slinuté karbidy typu WC-TiC-TaC (NbC)-Co,

analogickými materiály byly posléze nahrazeny slinuté karbidy typu WC-TiC-Co i v Evropě.

Přestože základní klíče k řešení problematiky byly nalezeny v Německu, mnoho dalších objevů bylo učiněno i v USA, Rakousku, Švédsku a dalších zemích. Vzhledem k podstatě výrobních patentů a strategické povaze wolframu probíhal celý historický vývoj slinutých karbidů v zásadě dvěma rozdílnými směry: produkce materiálů na bázi WC – tab. 1 a produkce materiálů, jejichž společným jmenovatelem byla snaha o naprosté vyloučení karbidu wolframu – tab. 2. Za významný mezník vývoje slinutých karbidů lze považovat jemnozrnné materiály, které se objevily na konci 60. let (obsahovaly jemnozrnná a rovnoměrná karbidická zrna). Střední velikost karbidických zrn prvních druhů jemnozrnných slinutých karbidů byla pod 1 μm , ve srovnání s 2-3 μm (někdy i více) u běžných druhů SK, nejnovější druhy mají jemná zrna s velikostí pod 0,5 μm . K hlavním výhodám jemnozrnných karbidů patří jejich vyšší pevnost, které lze dosáhnout bez snížení tvrdosti.

Rok	Nový materiál, technologie
1923-25	WC-Co
1929-31	WC-TiC-Co
1930-31	WC-TaC(VC,NbC)-Co
1933	WC-TiC-TaC(NbC)-Co
1938	WC-Cr ₃ C ₂ -Co
1956	WC-TiC-Ta(Nb)C-Cr ₃ C ₂
1959	WC-TiC-HfC-Co
1968-69	WC-TiC-TaC(NbC)-HfC-Co
1968-69	WC-TiC-NbC(TaC)-HfC-Co
1965-78	WC-TiN-Ti(C, N),HfC,HfN,Al ₂ O ₃ , povlaky na slinutých karbidech WC-Co
1967-70	Submikrometrové SK na bázi WC-Co
1965-75	Vysokoteplotní izostatické lisování (HIP)
1969-71	Termochemické povrchové kalení
1974-77	Vrstvy polykrystalického diamantu na SK na bázi WC-Co
1973-78	Vícevrstvé povlaky (karbidy, karbonitridy/nitridy, vícenásobné karbidy/karbonitridy/nitridy/oxidy)
1969-79	Komplexní slinuté karbidy s přísadou Ru
1981	Vícenásobné tenké povlaky typu Al (O, N)

Tab. 1 : Historický vývoj slinutých karbidů na bázi WC

Jedním z nejdůležitějších přínosů historického vývoje slinutých karbidů je dosažení řízeného obsahu uhlíku. Stechiometrický obsah uhlíku v karbidu wolframu je 6,12 hmotnostních %. Pokud se obsah uhlíku blíží výše uvedené hodnotě má slinutý karbid, např. WC-Co, normální strukturu, která obsahuje WC a gama-fázi (Co). Nežádoucí volný uhlík se ve struktuře objevuje v případě, že obsah uhlíku v karbidu wolframu je vyšší než 6,12% a křehká (rovněž nežádoucí) eta-fáze, např. W_3Co_3C v případě, že obsah uhlíku je nižší (v obou případech klesá zejména pevnost materiálu). Proto, aby slinutý výrobek měl požadovanou normální strukturu, byl tedy obsah uhlíku v WC až do 60. let řízen s přesností do 0,1%, což bylo pro daný účel zcela postačující. V polovině 60. let bylo ale zjištěno, že některé vlastnosti, jako je tvrdost a ohybová pevnost, jsou silně ovlivněny obsahem uhlíku v WC i v případě, že slinutý karbid vykazuje normální strukturu. Proto bylo řízení obsahu uhlíku zpřesněno na současné rozmezí od 0,02 do 0,03% (stejná je přesnost řízení obsahu uhlíku i pro cermety).

Poměrně krátká historie výroby slinutých karbidů je zatížena nedostatkem norem, nadměrným utajováním a přílišným rozdrobováním výroby. S výjimkou období 1939-1945 (II. světová válka), kdy produkce Německa i ostatní Evropy byla přísně normalizována, neexistovaly žádné průmyslové normy pro složení a vlastnosti těchto materiálů. Ve skutečnosti byly dlouhou dobu přijímány německé válečné normy, protože podrobnosti, které byly publikovány v prvních poválečných létech, sloužily jako základ informací pro mnoho dalších výrobců. Bohužel, těmito válečnými normami byly do značné míry ovlivněny i pozdější německé normy, které pak byly založeny spíše na aplikacích, než na složení a vlastnostech slinutých karbidů a tento princip byl později aplikován i do současného označování ISO.

Největším nedostatkem normy ISO pro slinuté karbidy tedy je, že se nejedná v pravém slova smyslu o skutečnou normu. Není proto možné na jejím základě kontrolovat kvalitu a vyřadit materiály, které nesplňují dané požadavky, případně hodnotit jednotlivé výrobce a dodavatele podle toho, jak jejich výrobky převyšují minimální požadavky normy. To tedy znamená, že pokud výrobce tvrdí, že jím vyráběný druh SK odpovídá této normě, má pravdu a nelze mu to vyvrátit.

V prvních aplikacích byl nový řezný nástroj vytvořen tak, že destičky ze slinutých karbidů byly pájeny do ocelových držáků. Změny v upevnění destičky

v držáku (z pájeného spoje na konstrukci s mechanickým upínáním) se objevily v polovině 50. let, v současnosti má již drtivá většina nástrojů mechanicky upínanou vyměnitelnou břitovou destičku (destičky). Vývoj nástrojů s vyměnitelnými destičkami měl výrazným vliv nejen na rozvoj geometrie nástroje a utvařeče třísky, ale i na rozvoj nástrojových materiálů a rozšíření jejich sortimentu (možnost použít materiály, které jdou obtížně pájet, jako jsou cermety a řezná keramika). Proto je přechod od pájených destiček k vyměnitelným právem považován za první „revoluci“ v novodobých dějinách vývoje řezných nástrojů (za druhou revoluci lze považovat rychlý rozvoj svlakovacích technologií).

Vývoj nových řezných materiálů s vyšší odolností proti opotřebení a vydrolování při vyšší řezné a posuvové rychlosti je problém, který nikdy nekončí. Zdá se, že v současné době je málo pravděpodobné, že bude objevena nějaká úplně nová tvrdá látka odolná proti opotřebení a využitelná pro řezné nástroje. Avšak další intenzivní výzkumné úsilí může jistě přinést významný pokrok ve zlepšení vlastností již existujících materiálů. Pevnost a houževnatost mohou být zvýšeny užitím nejrozvinutějších předvýrobních a výrobních technologií, navíc lze očekávat rovnoměrnější struktury bez defektů, zpevněné pomocí whiskerů, atd. Nové technologie povrchových úprav přinesou další zlepšení odolnosti materiálů proti opotřebení. Druh a povaha řezných nástrojových materiálů budou stále více orientovány na funkci nástroje a budou vyvinuty technologie, které umožní výrobu řezných materiálů odpovídajících specifickým požadavkům. Vývoj přitom nebude zaměřen pouze na rozšiřování jejich sortimentu, ale zejména na možnost aplikace jednotlivých druhů pro širší rozsah řezných podmínek.

Velký význam pro vývoj nových nástrojových materiálů má též nárůst řezného výkonu a s ním spojený nárůst úběru obráběného materiálu v důsledku vyšších řezných a posuvových rychlostí. Je proto třeba zaručit požadovanou trvanlivost řezného nástroje i spolehlivost jeho bezporuchové funkce (spolehlivost je zvláště důležitá zejména v souvislosti s rozšiřováním automatizace výroby a zvyšováním její účinnosti). Vzhledem k tomu, že k výraznému rozvoji dochází i u obráběných materiálů (v současnosti jsou při konstrukci strojírenských výrobků stále častěji užívány těžkoobrobitelné materiály, jako jsou superslitin, slitiny hliníku s velkým obsahem

křemíku, kalené oceli a litiny apod.), musí být v souladu s těmito trendy vyvíjeny takové nástrojové materiály, kterými lze tyto nové konstrukční materiály efektivně obrábět.

2.3.2 Nepovlakované slinuté karbidy

2.3.2.1 Rozdělení a značení

Současné standardní (běžné, nepovlakované) slinuté karbidy pro řezné aplikace jsou na základě svého užití rozdělovány normou ISO do třech skupin – P (barva označení modrá), M (barva označení žlutá), K (barva označení červená), s dalším dělením např. P10, M30, K20, kde vyšší číslo vyjadřuje vyšší obsah pojícího kovu, vyšší houževnatost a pevnost v ohybu a nižší tvrdost a otěruvzdornost materiálu a vymezuje oblast jeho aplikací pro nižší řezné a vyšší posuvové rychlosti.

Základními karbidy pro výrobu všech běžných druhů slinutých karbidů pro obrábění jsou karbid wolframu (WC) a karbid titanu (TiC), pojícím kovem je kobalt (Co), jako další přísady se nejčastěji používají karbidy tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr_3C_2). Vzhledem ke svému složení jsou běžné SK někdy také označovány jako jednokarbidové (K), dvojkarbidové (P) a vícekarbidové (M). Z tohoto hlediska lze proto k jednotlivým skupinám podle ISO přiřadit obvykle následující složení (karbidy, uvedené v závorce, netvoří samostatnou strukturní složku SK a jejich hlavním úkolem je zabránit růstu zrn hlavních karbidických fází):

- skupina K: WC + Co + (TaC.NbC)
- skupina P: WC + TiC + Co + (TaC.NbC)
- skupina M: WC + TiC + TaC.NbC + Co

Skupina K je určena pro obrábění materiálů, které vytvářejí krátkou, drobivou třísku (litiny, nezelezné slitiny a nekovové materiály). Řezné síly jsou přitom obvykle relativně nízké a převládá abrazní a adhezní opotřebení. Karbid wolframu, který tvoří jedinou tvrdou strukturní složku této skupiny SK má za pokojové teploty zhruba stejnou tvrdost jako TiC, s rostoucí teplotou ale ztrácí tvrdost rychleji než TiC. Proto jsou slinuté karbidy této skupiny nevhodné pro obrábění materiálů, tvořících dlouhou třísku, která mnohem více tepelně zatěžuje čelo nástroje (dlouhá tříska má větší plochu styku s čelem nástroje a doba jejího kontaktu s nástrojem je delší).

Skupina P je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku, jako jsou uhlíkové oceli, slitinové oceli a feritické nerezavějící oceli. Řezný proces je obvykle doprovázen velkými řeznými silami a značným opotřebením na čele (výmol – proto tato skupina SK obsahuje velké množství TiC a TaC, které zlepšují odolnost proti vymílání na čele nástroje). Přísada TiC zaručuje vysokou odolnost proti difúzi za vysokých teplot, která je jednou z hlavních příčin vytváření výmolu na čele nástroje v místě styku s odcházející třískou (WC naopak difunduje do povrchu třísky velice snadno). Vhodnost slinutých karbidů skupiny P pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou třísku je dána též vyšší tvrdostí TiC (stejně TaC.NbC) za vyšších teplot, ve srovnání s WC. Nevýhodou vlastností Tic a tuhých roztoků na bázi TiC je jejich vyšší křehkost a nižší odolnost proti abrazi ve srovnání s WC.

Skupina M má univerzální použití a je určena pro obrábění materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku, jako jsou lité oceli, austenitické nerezavějící oceli a tvárné litiny (vzhledem k relativně vysoké houževnatosti se SK této skupiny též často používají pro těžké hrubovací a přerušované řezy). Řezné síly dosahují středních až vysokých hodnot, dochází k vydrolování ostří.

Z běžných slinutých karbidů K, P, M je pouze omezený počet druhů užíván pro lehké a dokončovací obrábění (vysoká řezná rychlost, nízká posuvová rychlost a hloubka řezu). Druhy s vyšším číselným označením jsou obvykle používány pro stření a těžké obrábění, nebo hrubování (v důsledku své nízké tvrdosti nemohou být použity při vysokých řezných rychlostech, vyšší houževnatost ale umožňuje jejich užití pro vyšší posuvové rychlosti – zejména při přerušovaném řezu – a větší hloubky řezu), lze je také užít pro frézování a vrtání. Při nepřerušovaném řezání mají slinuté karbidy s nižším obsahem pojící fáze (zařazené do skupin s nižším číselným označením) lepší řezivost vzhledem k větší odolnosti proti plastické deformaci.

2.3.2.2 Výroba SK

Výroba slinutých karbidů představuje typickou metodu oboru, nazývaného prášková metalurgie, který se zabývá přípravou prášků odpovídajících karbidů a pojících kovů, jejich mísením v patřičných poměrech, lisováním směsi a slinováním výlisků.

Podstatou procesu výroby slinutých karbidů je lisování směsi prášku tvrdých karbidických částic s práškem pojícího kovu, nejčastěji kobaltu a následné slinování při teplotě blízké bodu tavení pojiva. Tím vzniká kompaktní materiál, jehož tvrdost se blíží tvrdosti výchozích karbidů a který vyniká poměrně vysokou pevností (zejména v tlaku, současné produkty předních výrobců i pevností v ohybu), protože jeho struktura je tvořena pevnou kostrou pojícího kovu, která obklopuje zrna relativně křehkých karbidů.

Obecný postup výroby slinutých karbidů lze na základě obrázku č. 3 rozdělit do následujících základních operací:

- výroba práškového wolframu
- výroba práškových karbidů (WC, TiC, TaC.NbC) a kobaltu
- příprava směsí uvedených prášků
- formování směsí
- předlisování zformovaných směsí (kolem 1000 °C)
- úprava tvaru předslinutého tělesa (v případě potřeby)
- slinování (1350 – 1650 °C)
- vysokoteplotní izostatické lisování (HIP – Hot Isostatic Pressing), kdy probíhá slinování za vysokých teplot a působení tlakového plynu, který zajistí rovnoměrný tlak na slinovaný výrobek ze všech směrů. Takto vyrobené slinuté karbidy mají vysokou hustotu, která se blíží teoretické hodnotě, s minimálním objemem pórů a jiných vad a při aplikacích pro řezné nástroje proto dosahují nejvyšších hodnot trvanlivosti.

Tvrdé karbidická částice jsou pro výrobu slinutých karbidů připravovány některou z následujících metod:

- litím
- karbidizací práškových kovů, hydridů, nebo oxidů kovů pomocí uhlíku v pevném skupenství
- karbidizací práškových kovů, hydridů, nebo oxidů kovů pomocí plynů, které obsahují uhlík (někdy s přísadou pevného uhlíku)
- usazováním z plynné fáze
- chemickým vylučováním z nauhličených feroslitin

- usazováním při elektrolýze roztoků odpovídajících solí

Výrobní procesy práškové metalurgie dovolují s velkou přesností řídit a kontrolovat jak složení slinutých karbidů, tak jejich zrnitost. Pojící fáze umožňuje slinování daleko pod bodem tavení karbidická fáze (např. pro systém WC-Co je to 1500 °C, zatímco teplota tavení WC je 2750 °C) a dodává slinutému karbidu potřebnou houževnatost a tepelnou vodivost.

Během slinování se tvoří eutektická fáze z pojiva a tvrdých částic, pro pseudobinární systémy (např. WC-Co) má eutektická teplota hodnotu přibližně 1340 °C (při přítomnosti volného uhlíku 1280 – 1298 °C).

Nad eutektickou teplotou se zhutňování uskutečňuje v následujících třech stupních (pořadí není jednoznačně potvrzeno):

- změna uspořádání částic pod vlivem napětí na hraničních plochách
- rozpuštění karbidů na energeticky přednostních místech a jejich opětovné vylučování, podporované vysokou rychlostí difúze v tekutém pojivu
- vytváření skeletu karbidické fáze difúzními pochody v tuhé karbidické fázi

2.3.2.3 Příprava směsi karbidů a pojiva

Příprava směsi karbidů s pojícím kovem (kobaltem, který se získá redukcí oxidů kobaltu ve vodíkové atmosféře) je jednou ze základních operací při výrobě slinutých karbidů, protože výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledného produktu (velmi důležité je zejména dodržení požadovaného poměru jednotlivých složek směsi). Hlavním cílem dané operace je vytvoření jemnozrné, homogenní práškové směsi karbidů a pojícího kovu (v mikroobjemu) mletím směsi za sucha nebo v kapalném prostředí (např. etylalkohol, metylalkohol, dichlóretylén, trichlóretylén, aceton, benzín, někdy i voda, v množství asi 0,25 litru na 1 kg směsi). Zvláště je důležité, aby po ukončení procesu byla jemná, rovnoměrně rozptýlená karbidická zrna dokonale obalena ještě jemnějším práškem pojícího kovu (to znamená, že původní práškový kobalt musí mít nejjemnější možnou strukturu). Mokrý mletí je výhodnější zejména z toho důvodu, že pracovní kapalina napomáhá disperzi jednotlivých částic, protože ve vznikajících úzkých

trhlkách dochází působením kapilárních sil k nárůstu napětí, trhlínky se rozšiřují a rozrušují konglomerát i jednotlivá zrna. Další výhody mokrého mletí lze vidět v minimalizování pracovní teploty a ochranném účinku proti oxidaci. Nevýhodou mokrého mletí je požadavek dokonalého vysušení směsi po skončení mlecího procesu (vzhledem k použitým kapalinám, které mají vesměs nízké hodnoty bodu varu, nečiní však jejich následné odstranění žádné zvláštní potíže).

Mletí obvykle probíhá v kulových mlýnech (kulový nebo častěji válcový buben naplněný mlecími koulemi, který se otáčí kolem horizontálně orientované osy), kde při pohybu uvnitř bubnu působí mlecí koule na pracovní směs rázovým a třecím účinkem. Rázovým účinkem působí pouze ty koule, které se nacházejí poblíž stěny bubnu (rozměňující konglomeráty a jednotlivá zrna karbidů i pojícího kovu a tím zmenšují jejich rozměry), třecí účinek je považován za velmi důležitý zejména z hlediska dokonalého rozmíchání a homogenizace směsi (účastní se ho všechny koule). Koule, podobně jako obložení stěn mlýnu, by měly být ze stejného druhu slinutého karbidu, pro který je směs připravována (jinak může dojít k znečištění směsi nežádoucími produkty z opotřebení koulí), jejich průměr se obvykle pohybuje v rozmezí 8-15 mm. Poměr objemů koule/směs bývá asi 2,5, ve speciálních případech, kde je požadováno zvlášť intenzivní mletí, dosahuje někdy hodnot 5-10. Mlecí účinek může být zvyšován vibracemi pružně uloženého mlýnu.

Mimo kulových mlýnů lze pro mletí směsi karbidů s pojivem použít i tzv. atritory. Jedná se o válcové nádoby se svisle orientovanou osou, které jsou podobně jako kulové mlýny zaplněny mlecími koulemi a mletou směsí, s tím rozdílem, že pohyb koulí není vynucován otáčením bubnu (buben se nepohybuje), ale otáčením míchadla umístěného v ose bubnu. Proces mletí je dlouhodobý a trvá několik dnů (48-72 hodin, pro nejjemnější směsi někdy až 96-120 hodin), po mletí se směs prášků prosívá.

2.3.2.4 Formování směsi

Směs práškových karbidů a pojícího kovu lze formovat lisováním ve formovacích lisech (tato metoda je užívána nejčastěji, zejména při výrobě vyměnitelných břitových destiček), hydrostatickým lisováním, vytlačováním přes trysku požadovaného tvaru nebo litím do pomocných forem.

Protože jde o tvarování vysoce disperzních směsí s nízkou plasticitou, přidává se do nich látka (tzv. plastifikátor, v množství 0,5-2%), která usnadňuje vzájemný skluz částic (zvyšuje tak stupeň zhutnění směsi), přidává polotovaru doplňkovou pevnost (v důsledku své tmelící schopnosti) a zaručuje zachování tvaru po vyhození polotovaru z lisovací formy. Plastifikátor musí splňovat několik základních požadavků, především se musí nechat lehce odstranit při sušení nebo předsunování za nižších teplot a nesmí znečistit polotovar nežádoucími příměsemi. Pro daný účel jsou užívány ty látky (první dvě nejčastěji):

- syntetický kaučuk rozpuštěný v benzínu (výhody: značná pevnost výlisku, možnost užití poměrně rychlých lisů, možnost odstranění až při slinování; nevýhoda: nedá se úplně odstranit)
- parafín rozpuštěný v tetrachlórmetanu nebo benzénu (výhody: umožňuje lisovní při vyšších tlacích, jde snadno odstranit; nevýhody: musí se odstranit ve speciální peci před slinováním, má nižší tmelící schopnost a pružnost než kaučuk a proto nelze použít rychlé lisy)
- lihový roztok glykolu (výhoda: jde snadno odstranit; nevýhoda: výlisek má nižší pevnost)
- kafr rozpuštěný v benzínu, acetonu nebo éteru (výhoda: jde snadno odstranit; nevýhoda: výlisek má nižší pevnost)
- pryskyřice rozpuštěná v benzínu nebo acetonu

Lisovací látky jsou relativně nízké a pohybují se v rozmezí 50-150 MPa. Výlisek musí být rovnoměrně zhutněn v celém objemu, a proto je nejčastěji používán princip dvojstranného lisování, kdy se dva písty pohybují proti sobě a lisují směs, která se nachází mezi jejich čelními plochami (čelní plochy pístů mohou mít například negativní tvar čela břitové destičky, včetně utvařeče třísky). Lisy pro lisování polotovarů vyměnitelných břitových destiček jsou velmi často označovány jako „tabletové“ nebo „pilulkové“ a obvykle zaručují konstantní tlak ve všech směrech (takto lisované polotovary se vyznačují rovnoměrnějším zhutněním). Rozměry výlisku musí být větší, než jsou rozměry hotového slinutého výrobku, vzhledem k lineárnímu všesměrovému smrštění při slinování, které činí 20 i více procent.

2.3.2.5 Slinování

Změna pórovitého výlisku na kompaktní výrobek probíhá zejména v důsledku změn podmíněných fázovým diagramem daného systému, ale též v důsledku dalších fyzikálně chemických pochodů. Slinování je pravděpodobně nejkritičtější fází výrobního procesu slinutých karbidů a do dnešní doby nebylo plně prozkoumáno.

2.3.2.6 Technologie slinování

Slinování může probíhat v ochranné atmosféře (vodík, vyčištěný a hlavně dokonale vysušený, s minimálním obsahem kyslíku – atmosféra výhodná zejména pro materiály WC-Co a materiály WC-TiC-Co s nízkým obsahem TiC), nebo ve vakuu a má obvykle tři etapy:

- předběžný ohřev (na teplotu 700-1000°C, v této fázi dochází např. k odstranění plastifikátoru)
- ohřev na pracovní teplotu a výdrž na této teplotě (teplota, která je nad teplotou vzniku tekuté fáze; podle obsahu Co v materiálech typu WC-Co a obsahu TiC a Co v materiálech typu WC-TiC-Co se pohybuje v rozmezí 1350-1650 °C, nižší hodnoty platí pro vyšší obsah Co a jemnozrnnější výchozí prášky)
- ochlazení

Vodíková atmosféra není vhodná pro vyměnitelné břitové destičky, protože v ní často dochází k vytváření nežádoucích povlaků (výhodnější je tedy slinování ve vakuu, i když uvedené povlaky lze odstranit např. broušením). Některé pece proto umožňují slinování ve vodíkové atmosféře v počátečním stádiu a slinování ve vakuu v konečném stádiu celého procesu.

Pece pro slinování mají zpravidla příčný průřez 100 až 300 cm² a délku 1-2 m, slinované výrobky, uložené v grafitových kontejnerech (pokud jsou výrobky náchylné k nauhličování, jsou vnitřní stěny kontejnerů pokryty izolační vrstvou prášku Al₂O₃) postupně procházejí celým pracovním prostorem pece. Po opuštění horkého pracovního prostoru postupují kontejnery do ochlazovacího prostoru, který obvykle přímo navazuje na ohřívací pec (podobně jako ohřev je i ochlazování nejčastěji postupné, v některých

případech, pokud to režim tepelného zpracování umožňuje, mohou být výrobky ochlazeny i náhle). Po potřebném ochlazení jsou hotové výrobky vyňaty z kontejnerů a tím je proces slinování ukončen.

Typické slinovací teploty, v závislosti na složení zpracovávaného materiálu, jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Složení materiálu [hm. %]					Slinovací teplota [°C]
WC	TiC	Ta (Nb)C	Cr ₃ C ₂	Co	
94				6	1540
91				9	1480
89				11	1460
87				13	1450
80				20	1400
75				25	1380
70				30	1350
96,5			0,5	3	1640
95			0,5	4,5	1620
93,5			0,5	6	1560
90,5			0,5	9	1500
85,5	7	3,5		4	1640
81,5	7	3,5		8	1560
80	14			6	1620
84	10			6	1600
87	7			6	1590
87	5			8	1550
66	25			9	1620

Tab. 2 : Typické teploty pro slinování SK v semikontinuální trubkové peci

2.3.2.7 Struktura a vlastnosti

Celý historický vývoj v oblasti nástrojových materiálů byl zaměřen především na zlepšení jejich odolnosti proti opotřebení (souvisí zejména s tvrdostí materiálu) a zvýšení pevnosti (hlavně ohybové ale též tlakové) a houževnatosti. V obecném smyslu jsou tvrdost a ohybová pevnost vzájemně neslučitelné a v praxi nelze obě tyto vlastnosti současně zlepšit jedním samostatným postupem, např. jednoduchou změnou chemického složení. Aby toho bylo dosaženo, je třeba pečlivě řídit mnoho faktorů, jako

je např. složení materiálu, velikost zrn a jejich rozložení (v současných slinutých karbidech pro řezné aplikace se zrnitost karbidické fáze pohybuje přibližně v rozmezí 0,5-5,0 μm), druh a množství přísad, rovnoměrnost mikrostruktury, obsah nekovových prvků (zejména C a N), množství a druh nečistot, defekty (póry a další), atd.

Nejvyšší hodnoty tvrdosti a pevnosti v tlaku vykazují SK s nízkým obsahem kobaltu, s rostoucím obsahem Co tyto hodnoty monotónně klesají. Pro libovolné složení materiálu je tvrdost tím vyšší, čím menší je velikost zrna tvrdých částic. Podobně, jako u rychlořezných ocelí, i u slinutých karbidů se málokdy sleduje pevnost v tahu a mírnou odolností proti porušení při funkci je ohybové napětí nebo mez pevnosti v ohybu. Průběh ohybové pevnosti má vzhledem k průběhu tvrdosti právě opačný charakter a dosahuje svého maxima u materiálů s nejvyšším obsahem Co a hrubozrnnou strukturou.

Při tahových nebo ohybových zkouškách probíhá porušení slinutých karbidů s téměř neznatelnou plastickou deformací, což je řadí mezi „křehké“ materiály, jako je sklo a keramika. Toto zařazení není ale opodstatněné, protože při působení pouze normálových tlakových napětí mohou SK vydržet značné plastické deformace, aniž by došlo k jejich porušení (tato vlastnost, kombinovaná s vysokou tvrdostí a vyhovující pevností, předurčuje vhodnost slinutých karbidů zejména v aplikacích pro řezné nástroje). Slinuté karbidy mají vyšší modul pružnosti v tahu a mnohem vyšší mez kluzu než oceli.

Jak již bylo uvedeno, vykazují slinuté karbidy typicky křehký lom a zdánlivá pevnost (např. pevnost v ohybu) je silně ovlivněna defekty, protože na nich je obvykle iniciována trhлина. V případě slinutých karbidů (i cermetů) jsou póry, velké tvrdé částice a segregovaný pojící kov hlavními defekty, na kterých se iniciuje trhлина. Shlukování tvrdých částic a segregace nečistot také působí všechny slinované tvrdé materiály a proto je zřejmé, že i u slinutých karbidů poroste pevnost bez poklesu tvrdosti jen tehdy, když bude snížen počet a velikost defektů. Je tedy třeba velice pečlivě řídit celou jejich výrobu, od produkce prášků, až po finální slinování, aby výsledným produktem bylo jednolitě slinuté těleso bez defektů.

Při slinovací teplotě se v pojící fázi do značné míry rozpouští uhlík i wolfram. Díky relativně pomalé difúzi zůstává při normálních rychlostech ochlazování wolfram

v pojící fázi v nerovnoměrném množství. Množství wolframu v roztoku vzrůstá s klesajícím obsahem uhlíku (zároveň klesá zrnitost výsledného slinutého karbidu). Rozsah zpevnění tuhého roztoku rozpuštěným wolframem má vliv na deformační charakteristiky pojící fáze a tím mění mechanické vlastnosti slinutého karbidu.

Vlastnosti řezných nástrojů ze slinutých karbidů závisejí tedy především na složení a zrnitosti materiálu, množství a velikosti strukturních defektů (např. póry), velkou roli hraje i kvalita vstupních surovin. Mezi hlavní příčiny pórovitosti slinutých karbidů patří:

- nízký obsah uhlíku (póry pod 25 μ m)
- nedostatečné rozmělnění směsi (póry pod 25 μ m)
- nehomogenita (nedostatečné promísení směsi, nestejná hmotnost prášku, nehomogenní rozložení plastifikátoru, póry 25-100 μ m)
- zachycené plyny (nedokonalé utěsnění pece vůči vnější atmosféře – průnik N₂ a CO do výlisků, póry pod 25 μ m)
- nečistoty (póry 25-100 μ m, případně libovolná velikost, podle okolností vzniku znečištění)

Nízký obsah uhlíku omezuje slinování a má podobný vliv, jako snížení množství pojiva (je-li obsah uhlíku tak nízký, že dojde k vytvoření podvojného karbidu wolfram-kobalt, je o tento karbid ochuzena aktivní pojící fáze).

Nehomogenita jednoznačně souvisí s mletím. Pokud mletí nebylo provedeno s potřebným účinkem, zůstane část pojící část pojící kovu ve výlisku ve formě velkých částic nebo shluků. Při slinování se tento kov roztaví a je vlivem povrchového napětí vtažen do spár mezi karbidickými částicemi v přilehlých oblastech. Je-li objem pojícího kovu velký, bude výsledkem pór, menší objemy kovu se roztaví v kobaltová jezírka, která lze rozptýlit jen prodloužením doby slinování, nebo zvýšením slinovací teploty.

Obsah pojícího kovu (kobaltu) ovlivňuje prakticky všechny fyzikální i mechanické vlastnosti slinutých karbidů, bez ohledu na jejich typ (v materiálech pro řezné aplikace se obsah kobaltu pohybuje obvykle v rozmezí 2-13%). Pokud obsah kobaltu roste:

- klesá měrná hmotnost
- klesá tvrdost
- klesá relativní odolnost proti abrazi
- klesá modul pružnosti v tahu
- klesá modul pružnosti ve smyku
- roste Poissonovo číslo
- roste pevnost v ohybu
- klesá pevnost v tlaku
- roste pevnost v tahu
- roste vrubová houževnatost
- mírně roste únavová pevnost
- roste koeficient délkové roztažnosti
- klesá tepelná vodivost
- klesá intenzita elektromagnetického pole
- roste magnetická permeabilita

2.4 Povlakované slinuté karbidy

Významným vývojovým krokem v oblasti slinutých karbidů během 60. let bylo zavedení výroby vyměnitelných břitových destiček s tenkými povrchovými vrstvami TiC (1969). Technika výroby těžkotavitelných karbidů současným vyloučením obou komponentů z plynné fáze je známá již od roku 1890, kdy byly v USA dělány pokusy ve výrobě zářivek, jejichž účelem byla ochrana žhavicího vlákna těžkotavitelnou sloučeninou (smyslem povlakování bylo zvýšení svítivosti).

První povlakované břitové destičky ze slinutého karbidu pro obrábění se na trhu objevily koncem 60. let (typ povlaku TiC, tloušťka vrstvy 4-5 μ m). Brzy nato byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN, povlaky Al₂O₃ přišli na trh v polovině 70. let. Povlaky byly vytvářeny metodou CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování) jako jedno i vícevrstvé, povlak Al₂O₃ vyžadoval vytvoření mezivrstev (např. TiC), aby byla zlepšena adhezni pevnost mezi povlakem a podkladem. Povlaky PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování) se objevily na začátku 80. let. Nejužívanějším povlakem PVD byl jednovrstvý TiN.

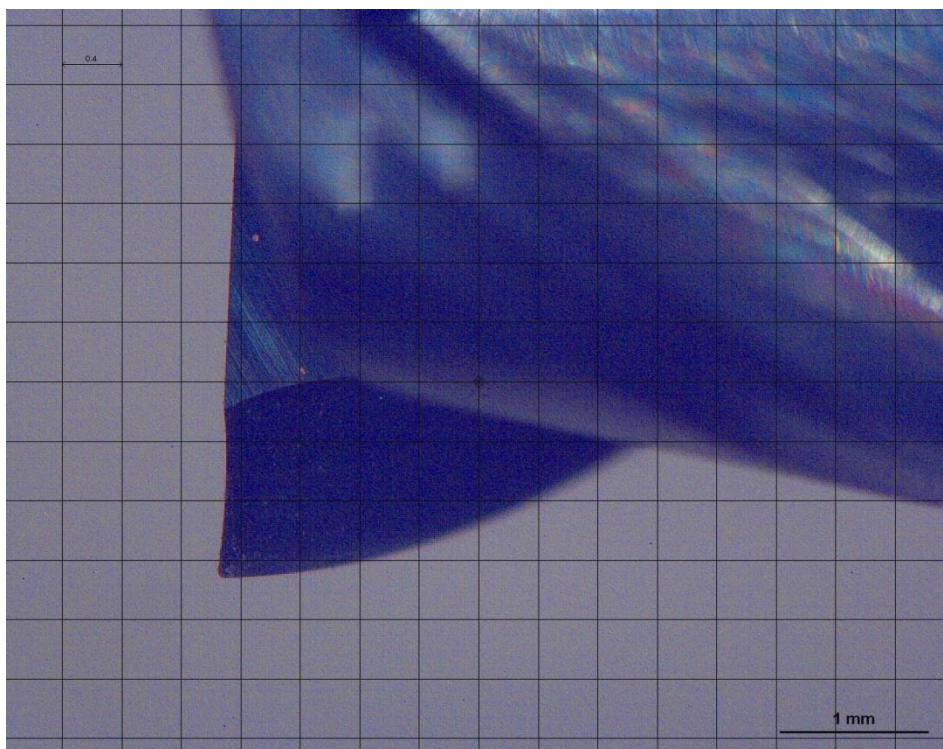
Původně postačovalo několik typů povlaků jako konkurence jiným nástrojovým materiálům, v současnosti je z hlediska uspokojování rostoucích požadavků každoročně vyvíjeno a zdokonalováno mnoho druhů povlaků. Jednotlivé materiály se navzájem liší druhem povlaku, kombinací vrstev, tloušťkou povlaku, metodou povlakování, substrátem, atd. Pro konkrétní aplikaci řezného nástroje z povlakovaného slinutého karbidu (obráběný materiál, řezné podmínky) je velmi důležitá správná kombinace všech uvedených faktorů, protože zejména na této skutečnosti závisí efektivnost jeho využití.

3. Posouzení současného stavu při výrobě nožových držáků z hlediska technologie a použitého nářadí

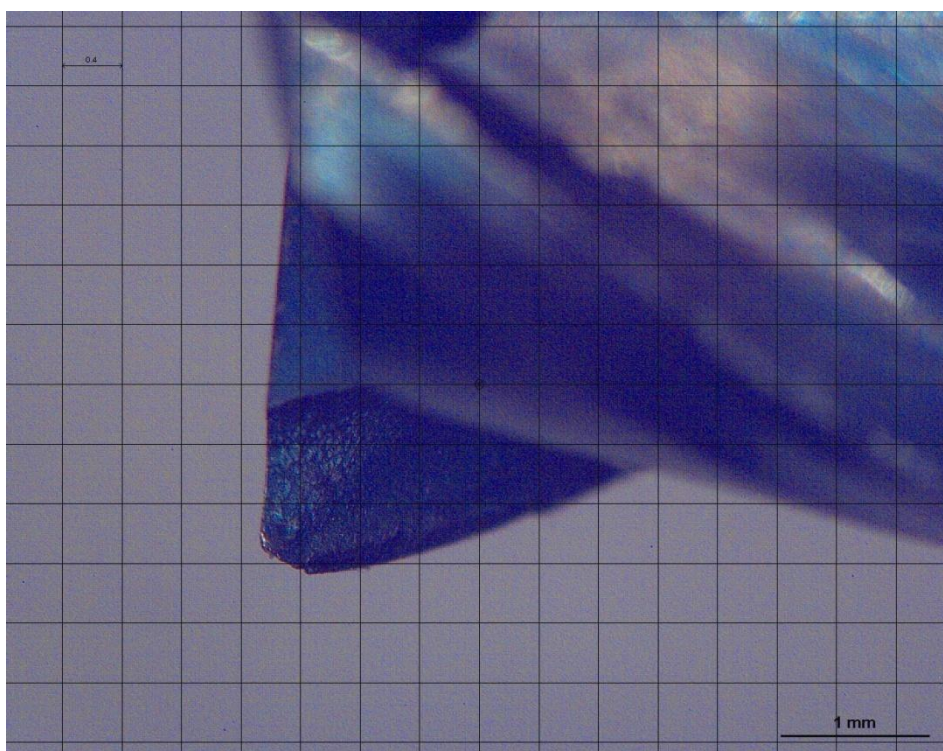
Byly zkoušeny 2 generace nástrojů (PRAMET 1, PRAMET NG) při výrobě nožových držáků při operacích:

- Hrubování lůžka 4břitou toroidní frézou:
 - při parametrech: řezná rychlost - $v_c=60$ m/min
posuv na zub - $F_z=0,020$ mm/zub
- Dokončování lůžka:
 - při parametrech: řezná rychlost - $v_c=60$ m/min
posuv na zub - $F_z=0,015$ mm/zub

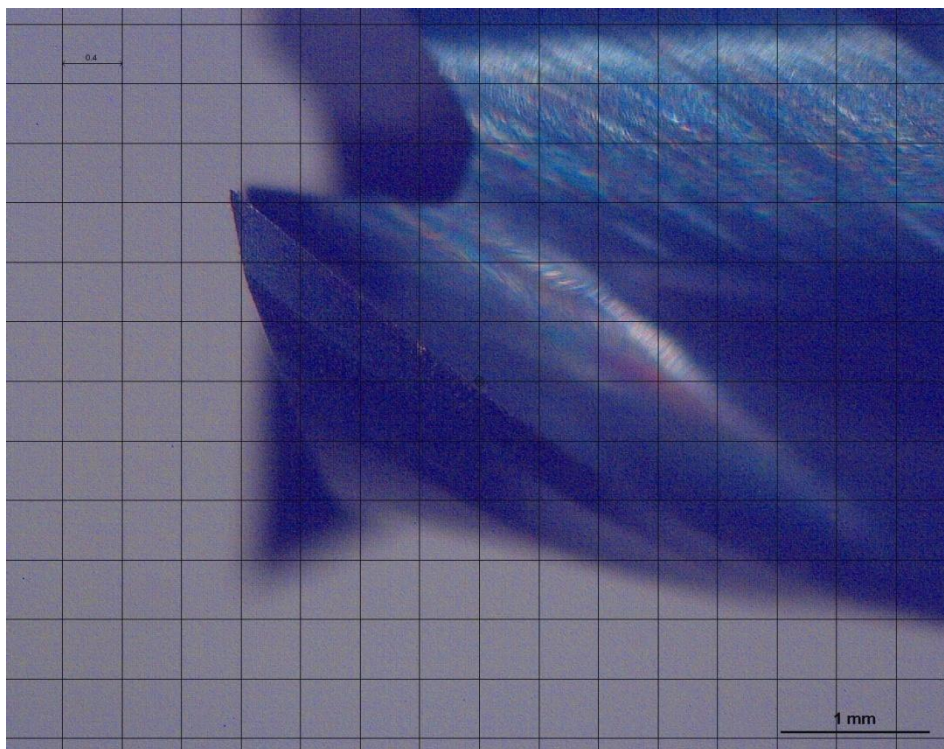
Tyto operace byly prováděny na dávce 40 ks polotovarů na výrobu nožových držáků, které jsou vyráběny s materiálu 16 343.7 s tvrdostí okolo 45 HRC (tvrdost dle Rockwella). Dle výsledků zkoušek nástroje Pramet 1 je zřejmé, že nástroj při hrubování lůžka vydržel celou dávku 40 ks, kdy na konci zkoušky měla fréza vyštípané rohy a dva břity, opotřebení VB (břitu) do 0,1 mm a pro další nasazení pro výrobu je nevyhovující. Obrázek č. 2,4 představuje nepoužitou frézu a obrázek č. 3,5 frézu po použití. Při dokončování lůžka současný používaný nástroj vydržel celou dávku 40 ks, kdy na konci zkoušky měla fréza vyštípané rohy a jeden břit, opotřebení VB do 0,1 mm a pro další nasazení pro výrobu je nevyhovující.



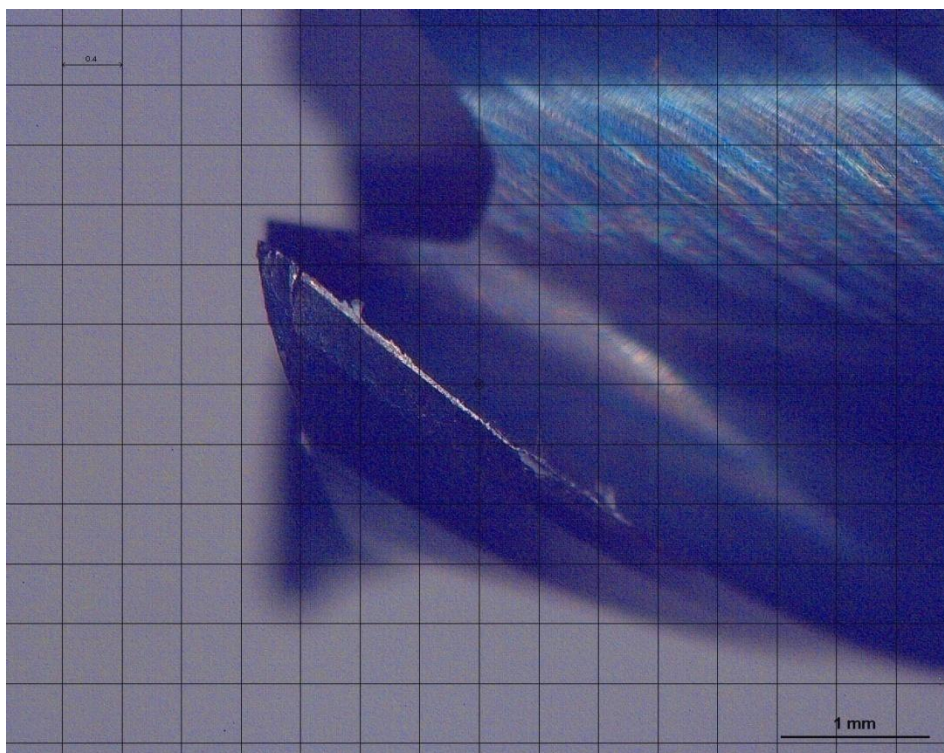
Obr. 2 Nepoužitá fréza



Obr. 3 Fréza po použití



Obr. 4 Nepoužitá fréza



Obr. 5 Fréza po použití

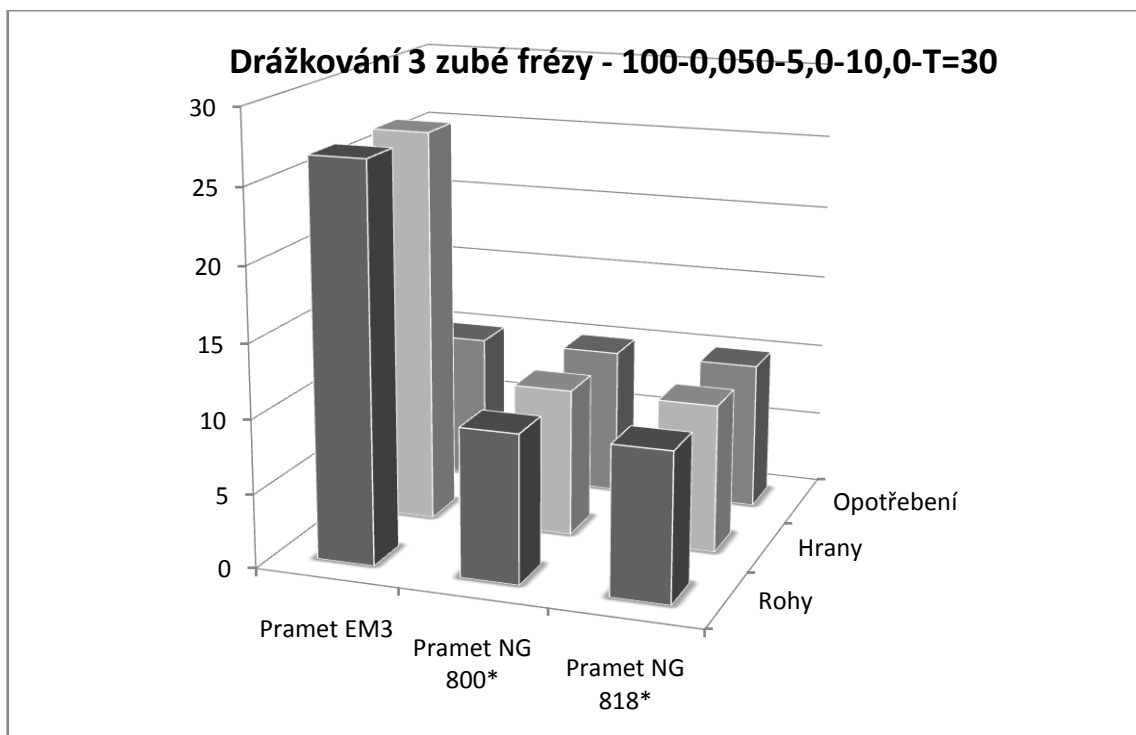
4. Výsledky zkoušek monolitních fréz

4.1 SE30 – geometrie při 180-200 HB

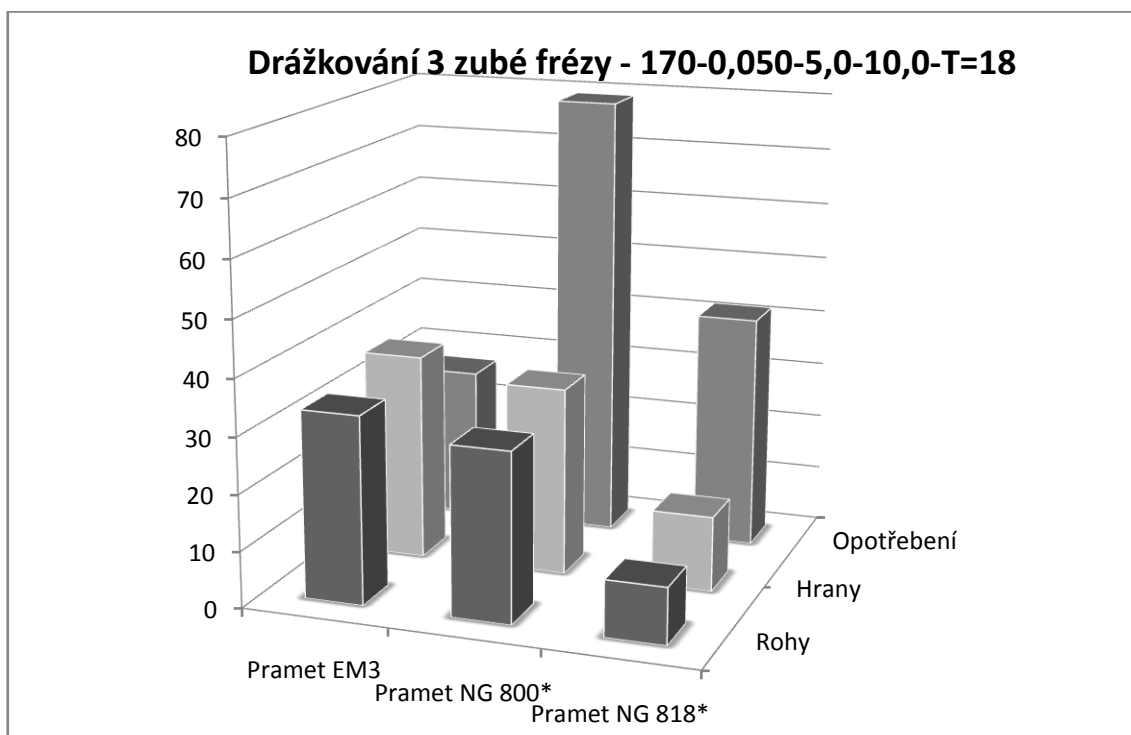
Dříve tato geometrie byla používána i pro materiály s větší tvrdostí. SE30 má tzv. „ostrou geometrii“ pro použití na měkkých materiálech a při použití na tvrdších materiálech se tato geometrie značně vyštipovala. Proto byla zavedena druhá geometrie SE 45, která je výhodnější pro obrábění materiálů kolem 45 HRC. Byly zkoušeny 3 zubé a 4 zubé frézy, kde z laboratorních zkoušek vyplývá, že 3 zubé mají lepší odvod třísky, ale 4 zubé mají lepší stabilitu.

Výrobce	Typ	Z	γ	λ	Směs	Povlak	
Pramet 1	EM ₃	3	10	40			
Pramet 1	EM ₄	4	10	30			
Konkurent 2	6	4	10	30			
Pramet NG	800	3	8	30	MG	B0809 (AlTiN)	
Pramet NG	818	3	10	40	MG	B0809 (AlTiN)	
Pramet NG	802	4	8	30	MG	B0809 (AlTiN)	
Pramet NG	820	4	10	40	MG	B0809 (AlTiN)	
Řezné podmínky							
		Vc	Fz	Ap	Ae	Q	Čas
Drážkování	3 zub é	100	0,050	5	10	23,89	30
		170	0,050	5	10	40,61	18
		200	0,050	5	10	47,77	18
Drážkování	3+4 zub é	130	0,040	5	10	24,84/33,12	29/22
		130	0,040	10	10	49,68/66,24	14/11
Boční frézování	4 zub é	172	0,061	10	2	26,73	30
		200	0,061	10	4	53,46	15
		200	0,061	10	2	31,08	28

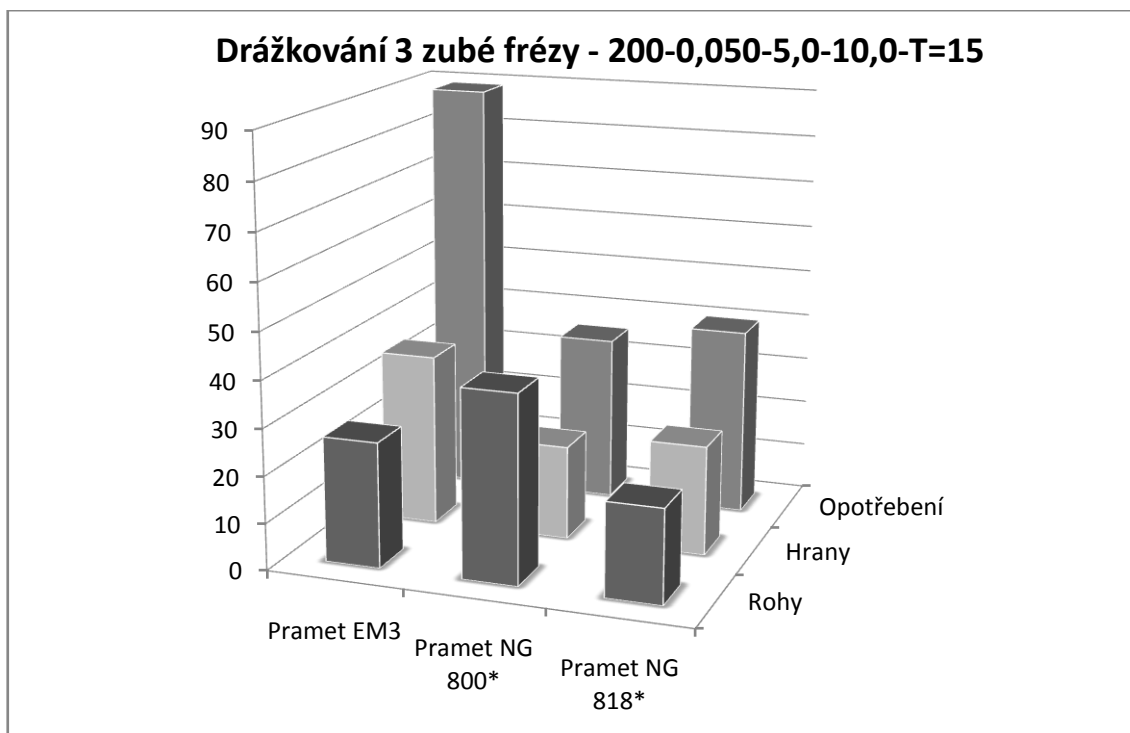
Tab. 3 Zkoušené SE30 frézy a řezné podmínky



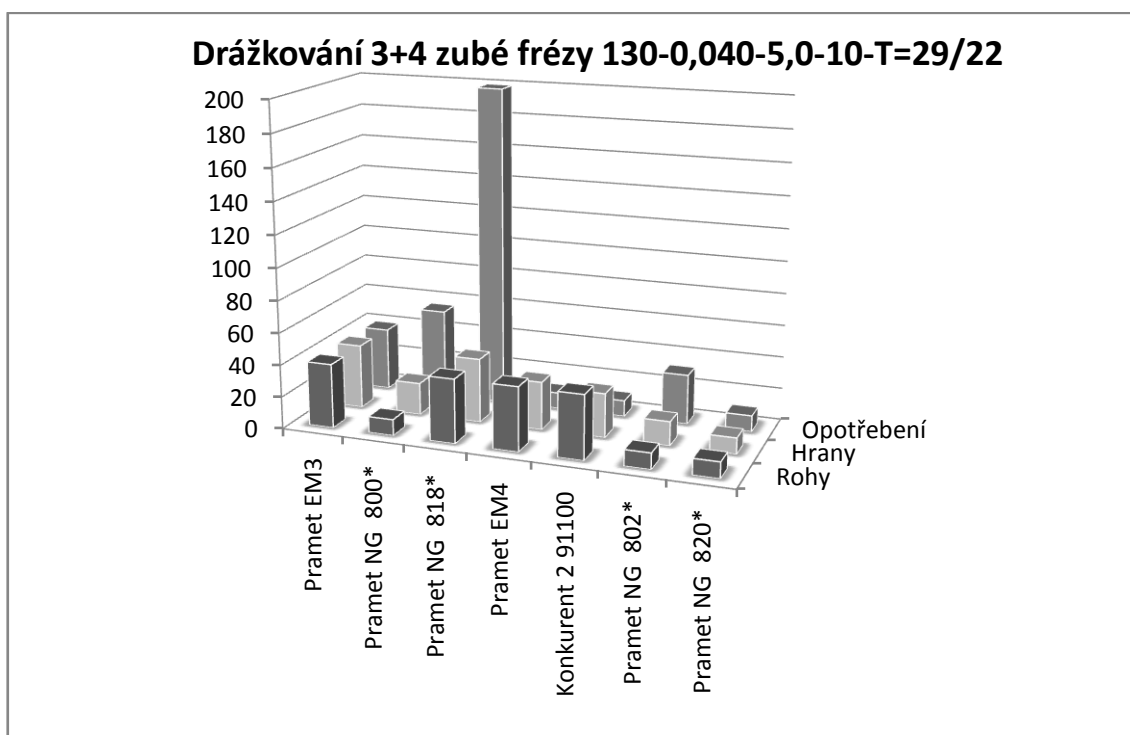
Graf č. 1 – Nejlépe dopadli Pramet NG 800,818, Pramet EM3 měla velké vyštípání



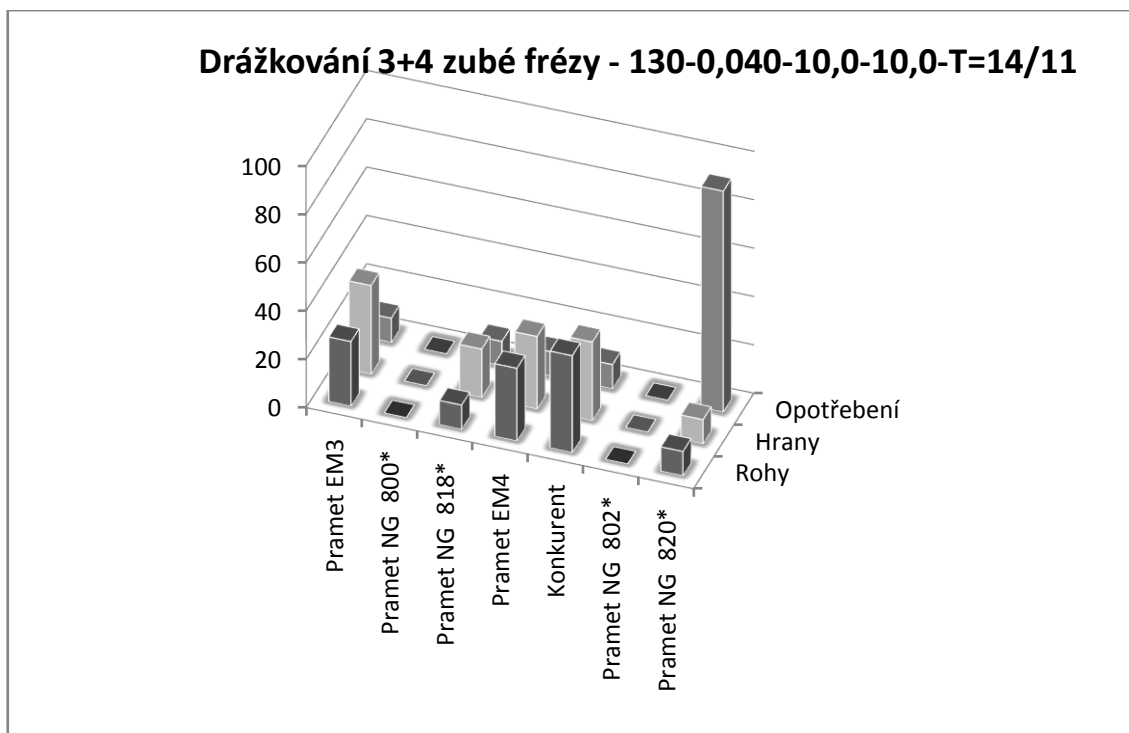
Graf č. 2 Nejlépe dopadla fréza Pramet NG 818, Pramet NG 800 měla velká opotřebení



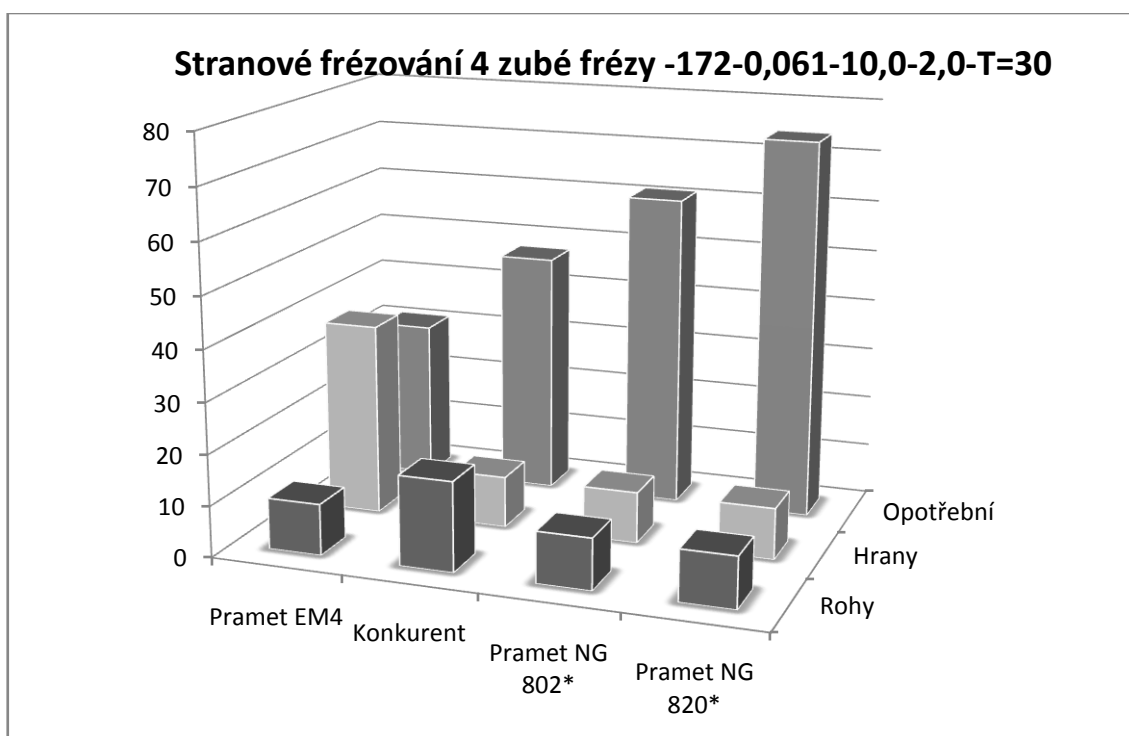
Graf č. 3 Pramet NG 800 a 818 dopadly srovnatelně, Pramet EM3 měla velké opotřebení



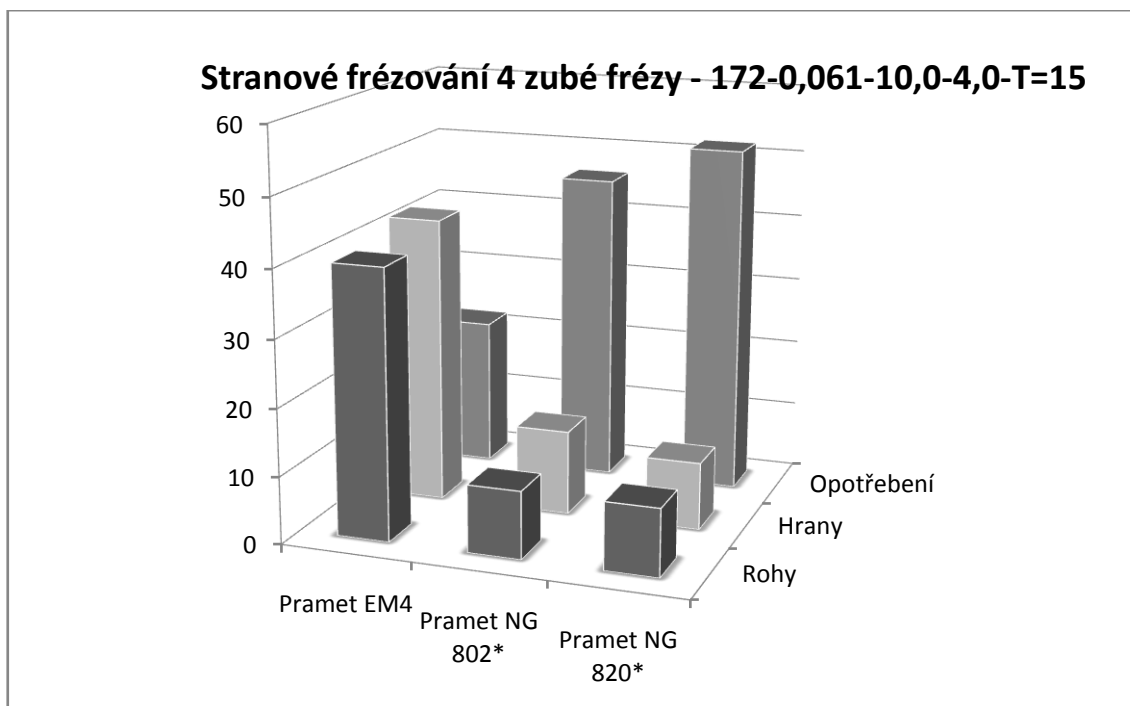
Graf č. 4 Nejlepší byla fréza Pramet NG 820, nejhůře Pramet NG 818



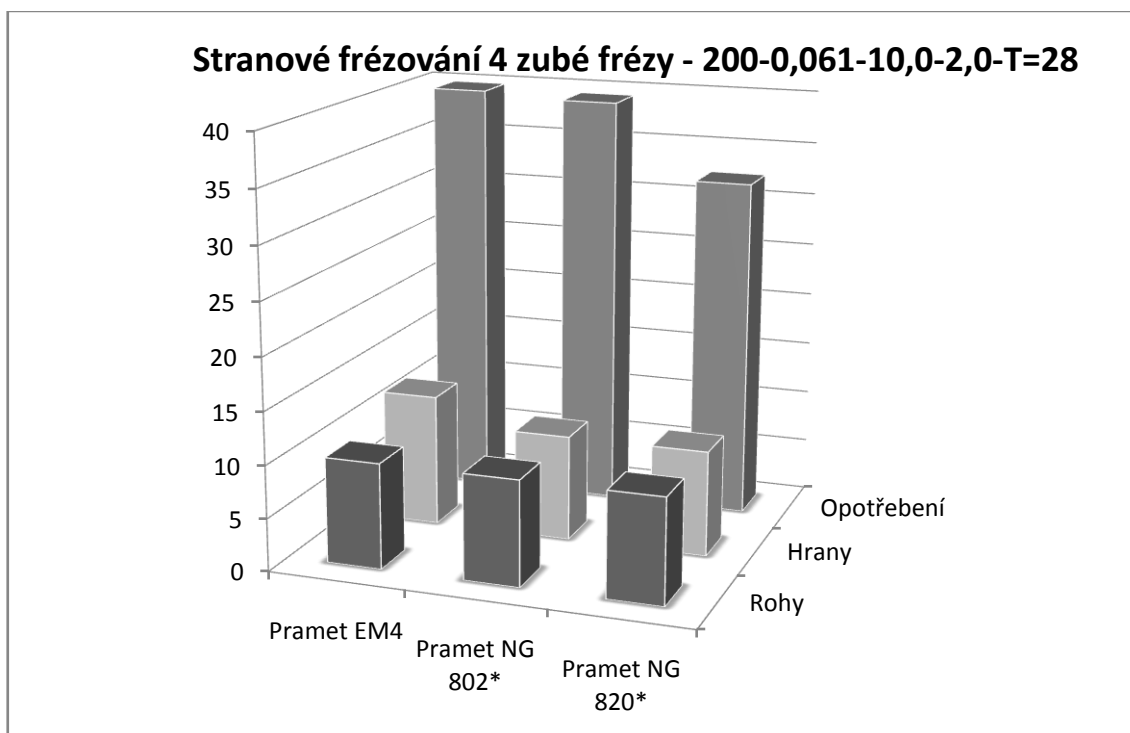
Graf č. 5 Nejlepší byla Pramet NG 818 (tam kde jsou nulové hodnoty, došlo u frézy zlomení nebo příliš velké opotřebení)



Graf č. 6 Pramet NG byly srovnatelné s konkurencí, Pramet EM4 měla velké opotřebení hran



Graf č. 7 Pramet NG 802 a 820 dopadly srovnatelně, Pramet EM4 měla velké opotřebení hran a rohů

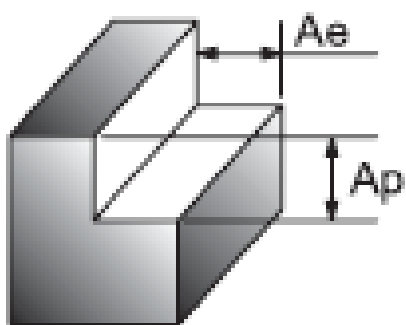


Graf č. 8 Při těchto řezných podmínkách jsou všechny tři frézy srovnatelné, Pramet NG 820 dopadla o něco lépe

4.2 SE45-geometrie při 47 HRC – Stranové frézování

Nástroj	Označení	Lambda [°]	Gama [°]	Doporučené řezné podmínky	
	4 zubé frézy				
Pramet NG	8630600 (MG-B0819)	40	3	66-0,043-9-1,2	
Pramet NG	6350600 (UF-B0819)	40	3	66-0,043-9-1,2	
Konkurent 2	1	30	10	115-0,042-6-0,6	
Pramet 1	EM4 6060-20	30	Neuv.	110-0,026-6-0,6	
Konkurent 2	2	55	-10	120-0,055-9-0,9	
Konkurent 2	3	30	7	120-0,030-9-0,6	
Řezné podmínky					
Vc	Fz	Ap	Ae	Q	Čas (min)
115	0,042	6	0,6	3,69	60
66	0,043	9	1,2	6,48	60

Tab. 4 Zkoušené SE 45 frézy a řezné podmínky



Vc – řezná rychlost

Fz – posuv/zub

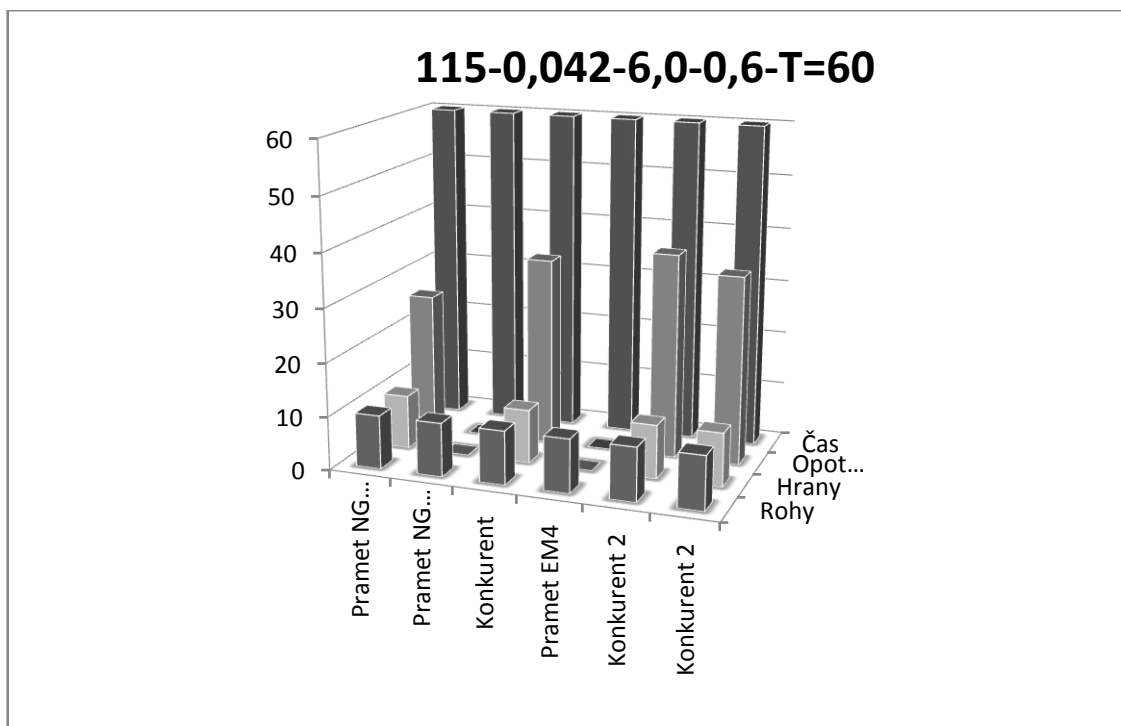
Ap – hloubka řezu

Ae – šířka záběru

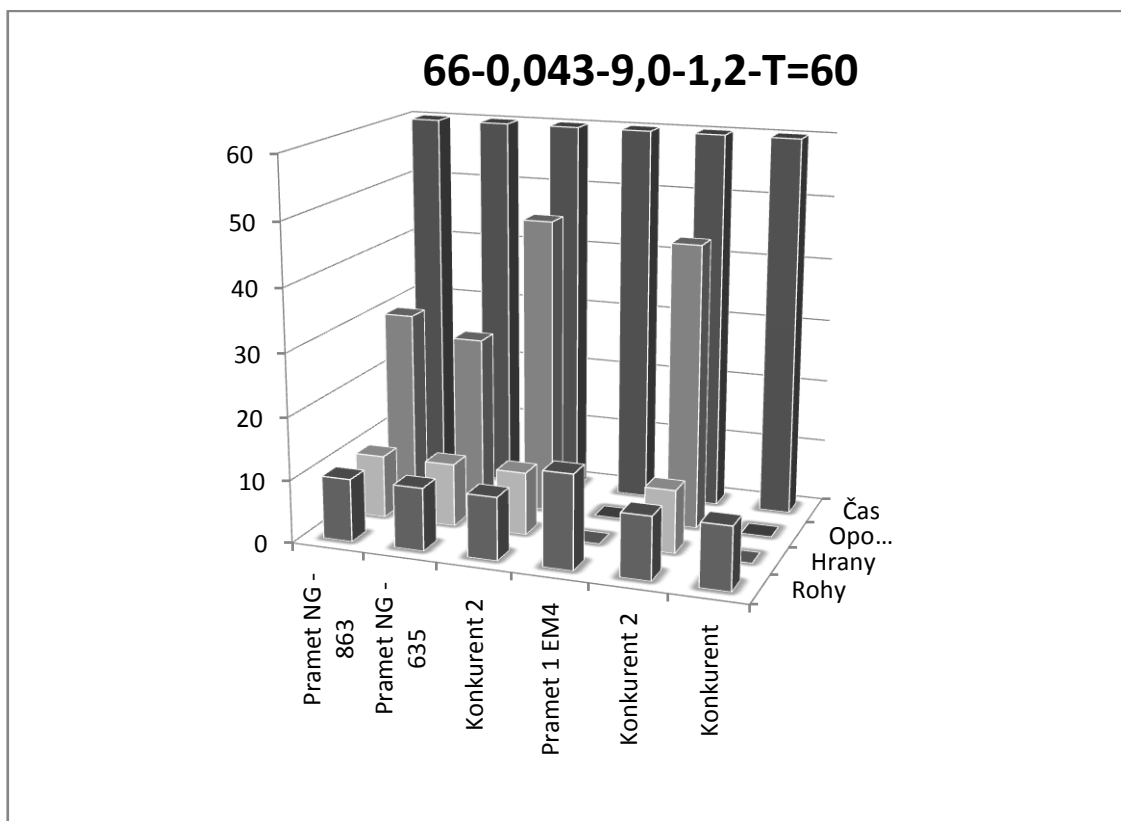
Q - množství odebíraného materiálu [cm³/min]

Způsob hodnocení:

- Rohy – normální opotřebení (10b), uštípnuté (20b), zničené (40b)
- Hrany – normální opotřebení (10b), malé vyštípání (20b), velké vyštípané oblasti (40b), více než 50% vyštípáno (50b)
- Opotřebení – průměrné hodnoty opotřebení
- Další kritéria – dráhy, čas



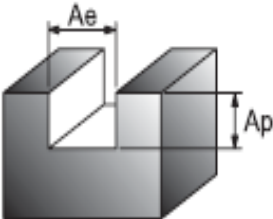
Graf. č. 9 Nejlepší byla Pramet NG 863, nulové hodnoty znamenají příliš velké opotřebení

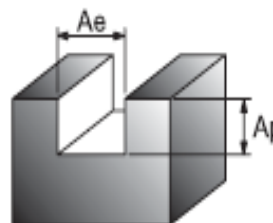


Graf č. 10 Nejlépe dopadly Pramet NG 863 a 635, nejhůře Konkurent a Pramet 1 EM4

4.3 SE45 – geometrie při 47 HRC – Uzavřené drážky

Nástroj	Typ	Průměr - D	Počet zubů – Z	Popis	
Pramet 1	EM2 100100-25 GEMI	10	2		
Pramet 1	EM3 100100-25 GEMI	10	3		
Pramet 1	EM4 100100-25 GEMI	10	4		
Konkurent 2	4	10	2		
Konkurent 2	5	10	4		
Pramet NG	400 1000 075	10	2	MG-B0819	
Pramet NG	863 1000 075	10	4	MG-B0819	
Pramet NG	635 1000 075	10	4	UF-B0819	
Řezné podmínky					
Z	Fz	F _{min}	F _{min} - D	A _P	Drážek/30 min
2	0,025	80	40	3	36
2	0,025	80		0-4	45
3	0,025	120	40	3	54
3	0,025	120		0-4	63
4	0,019	120		0-4	63
4	0,025	160		0-4	81

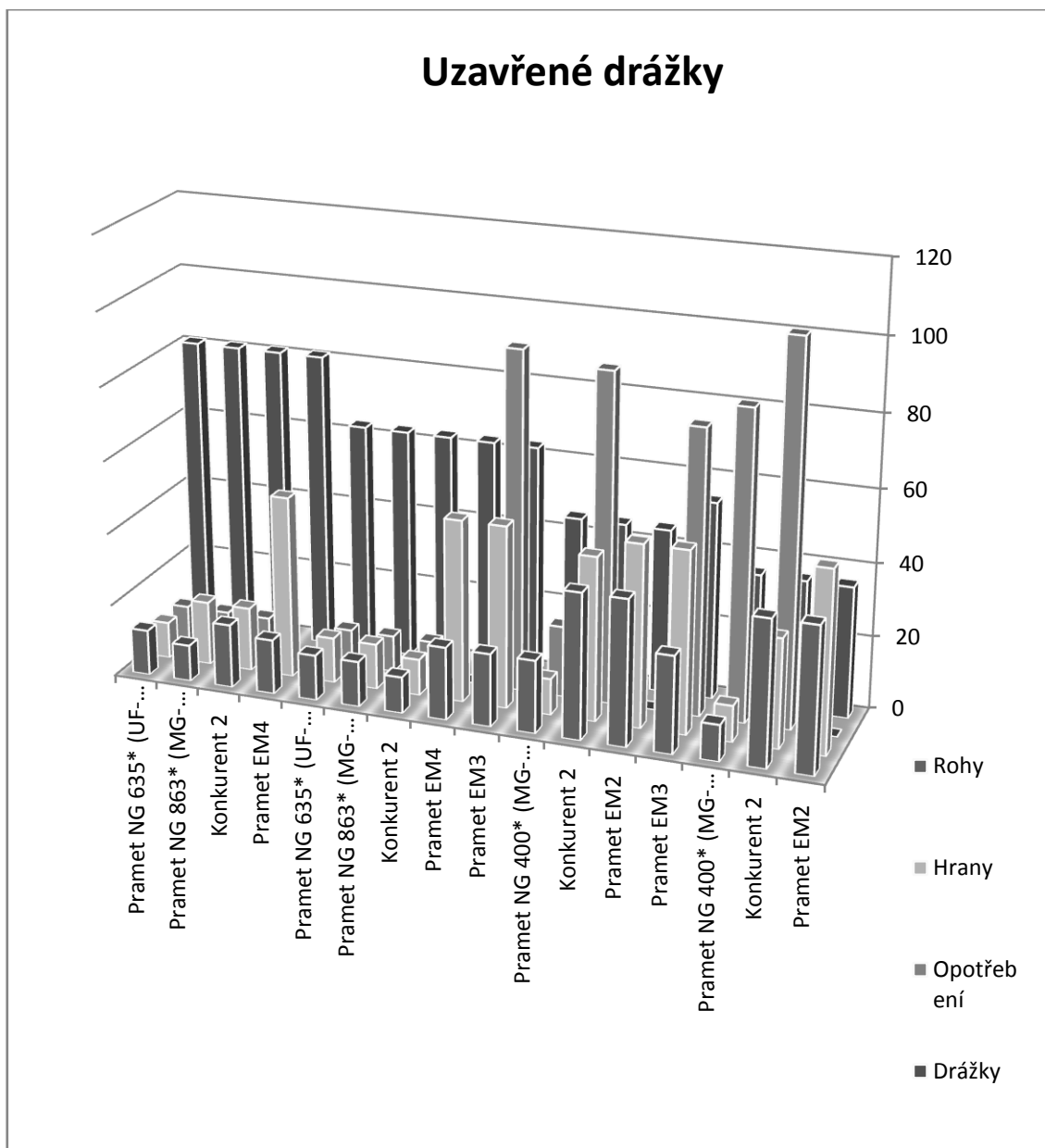




Tab. 5 Zkoušené frézy SE 45 při 47 HRC – Uzavřené drážky

Z- počet zubů, Fz- posuv/zub, F_{min}-minutový posuv [mm/min], F_{min}-D, A_p hloubka řezu

Uzavřené drážky byly vytvářeny dvěma způsoby. Najíždění po rampě a zavrtáním, kdy způsob najíždění po rampě je výhodnějším způsobem, který nezpůsobuje takové opotřebení frézy při stejné produktivitě jako zažitéjší způsob zavrtáním i množství vyfrézovaných drážek bylo u najíždění po rampě vyšší.



Graf č. 11 Porovnání fréz při vytváření drážky výše uvedenými způsoby

Shrnutí výsledků:

Výroba nožových držáků z 16 343.7 (45 HRC)

Fréza Pramet 1 EM4 6060-13-05 GEMI při hrubování lůžka vydržela celou dávku 40 ks, kdy na konci zkoušky měla vyštípané rohy a dva břity a byla pro další nasazení do výroby nevyhovující a výroba dávky trvala 59 min. Fréza Pramet NG A26 0600 060 0600 050 vydržela celou dávku při vyšší řezné rychlosti oproti Pramet 1 EM4, kdy na konci zkoušky byla nevyštípaná a bez znatelného opotřebení. Pro další nasazení

do výroby i nadále použitelná a výrobní čas dávky byl 36 min, to znamená úsporu 23 min na dávce 40 ks.

Fréza Pramet 1 EM4 4060-06 GEMI při dokončování lůžka vydržela celou dávku, kdy na konci zkoušky měla vyštípané rohy a jeden břit a byla pro další nasazení do výroby nevyhovující, doba výroba dávky 32 min. Fréza Pramet NG A06 0400 050 06 vydržela celou dávku při vyšší řezné rychlosti oproti EM4, kdy na konci zkoušky byla nevyštípaná, bez znatelného opotřebení a je i nadále použitelná. Výrobní čas dávky byl 14 min, to znamená úsporu 18 min výrobního času.

SE 45 – geometrie při 47 HRC

Fréza Pramet NG 635 a Konkurent 2 byly vyštípané v některých testech a Pramet 1 byl vyštípan ve všech testech. 4 zubé frézy jsou mnohem stabilnější a mnohem výkonnější než 2 zubé nebo 3 zubé frézy. Nejlepší mezi 2 zubými frézami vyšla z testů fréza Pramet NG 400. Nejlepší mezi 4 zubými frézami vyšla fréza Pramet NG 863.

SE 30 – geometrie při 180 HB

U všech fréz Pramet NG se při prvních zkouškách na hřbet nalepoval materiál. Proto se zkoušely povlaky a jako nejlepší vyšel G6110, kdy při druhých zkouškách již nalepování nebylo. Frézy Pramet 1 byli vyštípané při každém testu. Nejmenší opotřebování při drážkování měla 4 zubá fréza Pramet NG 820 a při bočním frézování měla nejlepší výsledky také fréza Pramet NG 820.

Porovnání Konkurent 2 a Pramet NG fréz:

Z všestranného hlediska jsou Pramet NG čtyř zubé frézy doporučeny pro hrubování, dokončovací operace a také pro drážkování, tzn. pro všechny strategie. Konkurent 2 čtyř zubé frézy nejsou doporučeny pro drážkování a pro hrubování je doporučována menší hloubka řezu než u Pramet NG fréz. Z hlediska stability měli frézy Konkurent 2 více časté problémy s uštipováním hran. Z hlediska produktivity jsou na tom mnohem lépe frézy Pramet NG. Tudíž frézy Pramet NG jsou srovnatelné a lepší ve srovnání s konkurencí.

5. Návrh řešení a zhodnocení navrženého řešení

Vzhledem k získaným výsledkům testů monolitních fréz nové a starších generací navrhuji zavedení nové generace Pramet 3 monolitních fréz do výroby, jak pro nožové držáky, tak i pro ostatní výrobu, protože úspory podle testů mohou být relativně vysoké. Jak je zřejmé z výsledků zkoušek, tak úspora času jen na jednu dávku vyráběných nožových držáků, při operaci hrubování lůžka, vzhledem k lepším vlastnostem a umožňované vyšší řezné rychlosti činí 23 minut. Zároveň při operaci dokončování lůžka nožového držáku je úspora času 18 minut. Dohromady to tedy činí úsporu 41 minut na výrobu jedné hotové dávky 40 ks držáků. Frézy se kromě zkoušek na nožových držácích zkoušeli i na dalších materiálech a i z těchto testů vyplynulo, že frézy Pramet 3 jsou ve většině ohledů lepší než současná generace nástrojů.

Zhodnocení vlastního návrhu řešení je docela těžké, ale vzhledem k použitým strojům, jako jsou obráběcí CNC centra, která patří mezi neproduktivnější způsobům obrábění a navíc výměna obráběcího stroje tohoto typu nepatří mezi nejlevnější záležitosti. Proto se mi zdá jako optimální varianta použití nové generace monolitních fréz, která přináší časovou úsporu a také dle výsledků lze novou generaci fréz používat déle díky vyšší životnosti nástroje. Navíc i cenově by nová generace měla vycházet lépe než předešlé.

Závěr

Z naměřených a zhodnocených výsledků vyplývá, že monolitní frézy nové generace vyráběné firmou Pramet Tools s.r.o. jsou na lepší úrovni než současná generace jejich nástrojů. Nové frézy nemají tak velké opotřebení, oštípání hran a rohů, dokáží pracovat při vyšších řezných podmínkách a vzhledem k výsledkům zkoušek nejsou pouze na „jedno použití“, ale po jedné dávce je bylo možné, díky větší životnosti, znovu použít ve výrobě. Dále není zanedbatelná ani úspora výrobního času, která činí 41 minut na celou dávku, což v dnešní době hledání úspor je docela dobrý výsledek. Tyto lepší vlastnosti jsou zřejmě zapříčiněny lepší geometrií nástroje, lepším substrátem na výrobu slinutého karbidu a v neposlední řadě povlakem slinutého karbidu. Dobré vlastnosti a výkony nové generace monolitních fréz z nich činí konkurenceschopné nástroje navíc dle předběžných odhadů i cena těchto nových nástrojů vzhledem k jejich vlastnostem a vyšší produktivitě práce oproti předešlé generaci by měla být srovnatelná.

Při drážkování dvou a tří zubé frézy byly obvykle více vyštipané a měli zničené rohy, než čtyř zubé frézy po stejném čase v záběru. Všechny Pramet 1 frézy byly vyštipané, ale frézy Konkurent 2 pouze dvou a tří zubé. Všechny Pramet NG a Konkurent 2 čtyř zubé frézy měly dobré výsledky. Pramet NG SE30 geometrie je lepší řešení než současný sortiment, protože tato geometrie se tolik nevyštipává jako předchozí. Nejlepší druh povlaku pro SE 30 geometrii je G 6110 (AlCrN – jednovrstvý). Pramet NG SE45 geometrie je lepším řešením než současný sortiment a je srovnatelný s konkurencí. Tato geometrie se nevyštipává tolik jako současná. Doporučená kombinace je MG substrát a povlak B 0819.

Seznam použitých zdrojů

[2] – Doc. Ing. HUMÁR, Anton CSc. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. CCB spol. s.r.o. 1995. ISBN 80-85825-10-4

[1] – Pramet Tools s.r.o. Historie a dnes. [online]. Citováno 2009-03-25.

URL: <<http://www.boldis.cz/citace/citace1.pdf>

Seznam doporučené literatury

Organizace a řízení [online]. Ostrava (Česka republika): FS Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008-. [cit.2008-12-14].

URL: <http://www.fs.vsb.cz/euprojekty/414/organizace-a-rizeni.pdf>

NOVÁK, Josef. Datová základna pro údržbu, montáže a další pomocné a obslužné práce: soubor základních technologických postupů. Ostrava 2004, 266 s.

Ekonomika a řízení provozů [online]. Ostrava (Česká republika): FS Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008-. [cit.2008-12-14].

URL: <http://www.fs.vsb.cz/euprojekty/414/ekonomika-a-rizeni-provozu.pdf>

TOMEK, Gustav. VÁVROVÁ, Věra. Řízení výroby. Grada Publishing, 1999. 439 s. ISBN 80-7169-578-5

Seznam obrázků

Obr. 1 Oblasti aplikace řezných materiálů	10
Obr. 2 Nepoužitá fréza	32
Obr. 3 Fréza po použití	32
Obr. 4 Nepoužitá fréza	33
Obr. 5 Fréza po použití	33

Seznam grafů

Graf. 1 SE 30 geometrie – drážkování 3 zubé frézy.....	35
Graf. 2 SE 30 geometrie – drážkování 3 zubé frézy.....	35
Graf. 3 SE 30 geometrie – drážkování 3 zubé frézy.....	36
Graf. 4 SE 30 geometrie – drážkování 3 + 4 zubé frézy.....	36
Graf. 5 SE 30 geometrie – drážkování 3 + 4 zubé frézy.....	37
Graf. 6 SE 30 geometrie – stranové frézování 4 zubé frézy.....	37
Graf. 7 SE 30 geometrie – stranové frézování 4 zubé frézy.....	38
Graf. 8 SE 30 geometrie – stranové frézování 4 zubé frézy.....	38
Graf. 9 SE 45 geometrie při 47 HRC – stranové frézování.....	40
Graf. 10 SE 45 geometrie při 47 HRC – stranové frézování.....	40
Graf. 11 SE 45 geometrie při 47 HRC – uzavřené drážky.....	42

Seznam tabulek

Tab. 1 Historický vývoj slinutých karbidů na bázi WC.....	16
Tab. 2 Typické teploty pro slinování slinutých karbidů.....	26
Tab. 3 Zkoušené SE30 frézy a řezné podmínky.....	34
Tab. 4 Zkoušené SE45 frézy a řezné podmínky.....	39
Tab. 5 Zkoušené SE45 frézy při 47 HRC – uzavřené drážky.....	41

Seznam příloh

Příloha I. CD nosič – s bakalářskou prací v elektronické verzi